

Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta

João Tiago Freitas de Abreu

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Jorge Lino Alves

Orientador no INEGI: Eng.º Santiago David Castellanos Villa MSc



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2017

À minha família.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e construção de uma impressora FDM do tipo delta para servir o Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços (LDPS), laboratório do DEMec da FEUP. Este desenvolvimento partiu de um conjunto de métricas e funcionalidades pré-estabelecidas. Entre estas métricas salientou-se o volume de impressão e a utilização de um extrusor multimaterial.

Neste projeto fez-se uma análise da tecnologia de impressão 3D pelo processo FDM, alguns dos materiais e parâmetros de impressão. Fez-se um levantamento dos tipos de impressoras existentes, comparando as suas características no contexto da robótica, e avaliou-se o funcionamento e aspetos construtivos típicos das impressoras do tipo delta.

O projeto RepRap, com uma filosofia de trabalho *open-source*, mostrou-se essencial para a obtenção de recursos úteis para o desenvolvimento da impressora tais como componentes, indicações de dimensionamento e *softwares* de controlo.

O dimensionamento da impressora e seleção de componentes apoiou-se no estabelecimento de ferramentas de cálculo e análises simplificadas do funcionamento. O desenho detalhado dos componentes foi feito através de um software de CAD de modo a analisar as montagens e funcionamento num ambiente virtual antes de passar ao seu fabrico. Os componentes foram fabricados usando processos de impressão 3D por FDM, funcionamento de chapa e maquinaria CNC.

Após a montagem do protótipo foram feitas as verificações e calibrações necessárias de modo a certificar-se o a geometria da impressora e funcionamento correto de todos os sistemas da máquina.

O funcionamento dos componentes desenvolvidos e selecionados foi o esperado. A estrutura da impressora provou ser rígida e estável. Para as peças teste impressas, em PLA, obteve-se erros na ordem das décimas de milímetro. A altura de camada mínima testada foi de 100µm tendo-se obtido uma boa qualidade superficial. Para impressões feitas a velocidades na ordem dos 80mm/s foi possível obter um grande detalhe nas peças testadas no entanto, no entanto para impressões rápidas (150mm/s) esses detalhes deixaram de ser preservados.

Development of a delta FDM 3D printer

Abstract

The main goal of this project was the development and construction of a delta FDM printer to serve Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços (LDPS), a lab from DEMec of FEUP. This development was made from an established set of metrics and functionalities such as the printing volume and the use of a multimaterial extruder.

An analysis of the FDM 3D printing technology was made showing some of the used materials and printing parameters. A survey was made of the types of existing printers, comparing their characteristics, in the context of robotics. The operation and typical constructive aspects of delta type printers were evaluated.

The RepRap project, with an open-source work philosophy, proved to be essential for obtaining useful resources for printer development such as components, sizing indications and control software.

The printer sizing and component selection was based on the establishment of calculation tools and simplified analysis of its operation. The detailed design of the components was done through CAD software in order to analyze the assemblies and operation in a virtual environment before proceeding to their manufacture.

The components were manufactured using 3D printing processes by FDM, sheet metal punching and CNC machining. After prototype assembly, necessary checks and calibrations were made to make sure the geometry of the printer and operation of all systems of the machine were correct.

The operation of the developed and selected components was as expected. The hardware proved to be stiff and stable. For printed test pieces, made from PLA, dimensional errors were in the order of tenths of a millimeter. The minimum layer height tested was 100µm and a good surface quality was obtained. Print speeds up to 80mm/s fine details were printed successfully. For faster prints (150mm/s), these details were no longer preserved.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que ajudaram, direta ou indiretamente, no decorrer deste projeto.

Começava por fazê-lo ao meu orientador na FEUP, professor Jorge Lino, pela proposta do tema, por ter facultado um conjunto de recursos bibliográficos que ajudaram a reforçar o interesse e o conhecimento na área da impressão 3D e por ter ajudado na organização dos conteúdos do relatório deste projeto.

Ao engenheiro Santiago Castellanos, meu orientador no INEGI, pelo acompanhamento nas fases de desenvolvimento, fabrico e montagem da impressora e sobretudo pela paciência demonstrada ao longo de todo este processo; por ter tratado dos aspetos de financiamento do projeto e por ajudar a gerir a utilização dos recursos necessários no INEGI.

Ao engenheiro Isaac Ferreira pela demonstração do funcionamento das impressoras 3D no LDPS, que permitiu uma melhor compreensão dos diferentes componentes das funções destas máquinas.

Ao engenheiro Leonardo Santana pela sua disponibilidade na partilha de conhecimentos e experiência na área da impressão 3D por FDM e pelo seu *feedback* nas fases iniciais do projeto.

Ao Daniel Ferreira por ter facultado a sua impressora pessoal para a produção de alguns componentes necessários para o projeto quando os equipamentos do laboratório não estavam disponíveis.

Aos vários elementos do INEGI que ajudaram no fabrico de alguns componentes da impressora e pela confiança depositada, permitindo a utilização de materiais e ferramentas neste instituto.

À minha família que me apoiou ao longo do meu percurso académico, facultando-me as condições necessárias para atingir os meus objetivos.

Índice de Conteúdos

1. Introdução	6
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	6
1.2 O Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços	6
1.3 Objetivos do projeto	6
1.4 Metodologia	6
1.5 Estrutura da dissertação	7
2 Revisão Bibliográfica.....	8
2.1 A impressão 3D	8
2.2 O processo FDM.....	10
2.2.1 Descrição do processo.....	10
2.2.2 Materiais	11
2.2.3 Parâmetros de impressão	12
2.2.4 Softwares de CAM e de controlo	14
2.2.5 Custos de operação	15
2.2.6 Vantagens e desvantagens	15
2.2.7 Inovações	16
2.3 Tipos de impressoras.....	18
2.3.1 Robótica	18
2.3.2 A configuração delta	21
2.4 Desenvolvimento de impressoras 3D de baixo custo	29
2.4.1 O movimento Open-Source.....	29
2.4.2 O projeto Fab@home.....	30
2.4.3 O projeto RepRap	31
2.4.4 O Arduino	33
2.4.5 Peças para impressoras 3D	34
3 Proposta de trabalho	35
3.1 Definição do problema	35
3.2 Metodologia	36
3.3 Benchmark de impressoras delta	37
3.4 Características-alvo	37
3.5 Arquitetura do produto	39
3.6 Processos de fabrico disponíveis	40
4 Desenvolvimento.....	41
4.1 Dimensionamento preliminar.....	41
4.1.1 Relações geométricas.....	41
4.1.2 Estabelecimento das dimensões gerais da máquina.....	45
4.2 Desenho detalhado.....	47
4.2.1 Efetor.....	47
4.2.2 Braços	48
4.2.3 Carris.....	49
4.2.4 Solicitações mecânicas	50
4.2.5 Sistema de transmissão	53
4.2.6 Chassis.....	56
4.2.7 Sistema de extrusão	58
4.2.8 Base de impressão	62
4.3 Eletrónica	63
4.3.1 Ligação dos componentes eletrónicos	65
4.3.2 Fonte de alimentação.....	67
4.3.3 Fins-de-curso.....	68
4.3.4 Painel de controlo	69

4.3.5	Configuração do firmware	70
4.4	Fabrico	71
4.4.1	Impressão de peças por FDM	71
4.4.2	Puncionamento de peças em chapa de alumínio	73
4.4.3	Torneamento dos espaçadores cilíndricos.....	74
4.4.4	Maquinagem dos painéis do chasis	75
4.4.5	Outras operações	75
4.5	Montagem, calibração e teste	76
4.5.1	Montagem.....	76
4.5.2	Calibração	79
4.5.3	Impressões teste.....	84
5	Conclusões	86
5.1	Trabalhos futuros.....	88
	Referências	90
ANEXO A:	Cinemática Delta.....	96
ANEXO B:	Benchmark de impressoras delta.....	98
ANEXO C:	Configuração do firmware	100
ANEXO D:	Peças impressas por FDM.....	102
ANEXO E:	Peças Puncionadas	103
ANEXO F:	Componentes adquiridos	104
ANEXO G:	Desenhos das peças fabricadas	105

Índice de figuras

Figura 1 – Estrutura da dissertação.....	7
Figura 2 - Comparação entre processos de manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B) [3].....	8
Figura 3 - Áreas de utilização de equipamentos de manufatura aditiva.[3]	9
Figura 4 - Principais aplicações de peças produzidas por manufatura aditiva.[1]	9
Figura 5 - Volume de vendas de impressoras de baixo custo [1].	10
Figura 6 - Processo de impressão FDM [17].	11
Figura 7 - Impressão FDM de diferentes materiais. a) PLA, b) PLA com partículas de madeira, c) PLA com partículas de café, d) ABS.....	12
Figura 8 - Influência da altura de camada no acabamento de uma semiesfera [22].	12
Figura 9 - Peça com diferentes percentagens de enchimento [24].	13
Figura 10 - Peça produzida por FDM com material de suporte em PVA [25].	13
Figura 11 – Elementos adicionados em impressões FDM a partir de softwares de CAM; a) skirt e b) brim [26].	14
Figura 12 - Preparação de uma peça para impressão por FDM através de um software de CAM Cura.	14
Figura 13 - Fatores que influenciam no custo final de uma peça produzida por FDM.	15
Figura 14 - Sequência de produção de uma peça pelo método de “Fill Compositing Technique” [29].	16
Figura 15 - Ilustração da técnica de Curved Layer Fused Deposition Modelling [30].	17
Figura 16 - Sistema de extrusão com fibra contínua [32].	17
Figura 17 - Impressão multimaterial. a) impressora Prusa I3 MultiMaterial [33] e b) peças obtidas através de mistura de material por uma impressora Zmorph [34].	18
Figura 18 - Robôs série e paralelos. a) Manipulador série do tipo SCARA [38] e b) Plataforma do tipo Gough-Stewart, um manipulador paralelo [39].	19
Figura 19 - Impressoras FDM baseadas em robôs série. a) Impressora cartesiana Prusa I3, b) Impressora polar Polar 3D, c) Impressora baseada num manipulador SCARA FLX.ARM. ...	20
Figura 20 - Impressoras FDM baseadas em robôs paralelos. a) Impressora delta DeltaMaker [42], b) Impressora CoreXY [43] e c) Impressora SCARA paralelo Wally [44].	21
Figura 21 - Ilustração do robô delta na patente registada por Clavel [46]. 1) placa de montagem, 2) veio, 3) motor de acionamento, 4) braço rotativo, 5) braço do paralelogramo, 6) e 7) rótulas, 8) efector e 9) ferramenta.	21
Figura 22 - Robô delta em operação numa linha de produção a fazer operações de pick-and-place [47, 48].	22
Figura 23 – Principais componentes e modo de funcionamento de uma impressora delta.	23
Figura 24 - Diferenças construtivas do efector, rótulas e braços [50, 51].	24
Figura 25 - Tipos de rolamentos lineares dos carris; a) rolamentos de esferas cilíndricos [52] , (b) rolamento de esferas de carruagem [53] e (c) carril com rodas [54].	24
Figura 26 - Tipos de chassis de impressoras delta; (a) chassis composto por perfis de alumínio extrudidos [55] e (b) chassis com painéis de melanina [50].	25

Figura 27 - Configuração Bowden da unidade de extrusão, muito comum em impressoras delta [53].....	25
Figura 28 - Placas de controlo para impressoras 3D; a) RUMBa [59] e b)Smoothieboard [60].	26
Figura 29 - Modelos 2040 e 3MT da WASP [63].	27
Figura 30 - Sistema LDM desenvolvido pela companhia WASP para impressão de cerâmicos [64].....	27
Figura 31 - Impressora SpiderBot (a) mostrando o extrusor duplo oscilante (b) e o aquecedor (c) [65].	28
Figura 32 - Impressora Pollen PAM (a), detalhe dos cartuchos de pellets (b) e sistema de injeção de multimaterial (c) [66].....	29
Figura 33 - Logotipo identificativo em hardware open-source [67].	30
Figura 34 – Impressora Fab@Home Model 1 [69].	30
Figura 35 - Darwin I, a primeira impressora 3D desenvolvida no âmbito do projeto RepRap [71].....	31
Figura 36 - Proporção de utilizadores de impressoras 3D de diferentes companhias [72].	32
Figura 37 - Impressoras delta desenvolvidas no âmbito do projeto RepRap; a) Helium Frog Delta Robot [73], (b) Rostock [74] e (c) Kossel [75].	32
Figura 38 – Placa de controlo para impressoras 3D composta por um Arduino Mega 2560 (a) e um Shield RAMPS 1.4 (b).	33
Figura 39 – Etapas e objetivos definidos para a realização do projeto.....	36
Figura 40 - Arquitetura do produto para a impressora a desenvolver, separada por diferentes módulos.	39
Figura 41 - Principais dimensões da máquina (DI – diâmetro de impressão; DM – diâmetro da máquina; l – comprimento dos braços; OC – offset do carril; OE – offset do efector).	41
Figura 42 - Ângulo α quando o efector se encontra no centro da área de impressão.	42
Figura 43 - Ângulo α quando o efector se encontra na periferia da área de impressão.	42
Figura 44 - Ângulo β quando o efector se encontra na periferia da área de impressão.	42
Figura 45 - Afastamento entre braços (d).	43
Figura 46 - Cálculo da altura das torres em função da altura de impressão desejada. (H – comprimento das torres; h – altura de impressão; l – comprimento dos braços)	43
Figura 47 - Relação entre a velocidade vertical dos carris e a velocidade horizontal do efector (fator de multiplicação).	44
Figura 48 - Variação do fator de multiplicação em função do ângulo α	44
Figura 49 - Resolução de posicionamento horizontal do efector em função de incrementos verticais da posição do carril, em torno de um ponto central.	45
Figura 50 - Extrusor de mistura "diamond hotend" selecionado para o sistema de extrusão [83]	46
Figura 51 - Esboço do efector para permitir a montagem do diamond extruder.....	46
Figura 52 - Sequência seguida para o desenho detalhado dos componentes.....	47
Figura 53 - Conjunto esfera/íman que compõem a rótula magnética.....	48

Figura 54 – Efetor.....	48
Figura 55 - Detalhe da extremidade de um braço.....	49
Figura 56 - Comprimento nominal do braço.	49
Figura 57 - Conjunto roda deslizante [87] e perfil v-slot [86] usado como rolamento linear. .	49
Figura 58 - Carril.	50
Figura 59 - Montagem da parte móvel: efetor, braços e carris.....	50
Figura 60 - Força resultante no efetor.	52
Figura 61 - Medição da força máxima de tração das rótulas magnéticas com um dinamómetro digital.....	52
Figura 62 - Força resultante num carril	53
Figura 63 - Redução de binário útil do motor devido ao controlo microstepping e por operar a 75% da sua capacidade máxima.	55
Figura 64 - Sistema de acionamento linear composto por um motor de passo e sistema de polias e correia GT2.	55
Figura 65 - Motor de passo NEMA 17 - 17HS16-2004S, usado para o acionamento do sistema de movimentação [93].	56
Figura 66 - Peça de fixação da correia ao carril.	56
Figura 67 - Cantos inferiores e superiores do chassis.	57
Figura 68 - Detalhes da interface entre os perfis e o canto inferior e da montagem do sistema de transmissão.	58
Figura 69 - Painéis dos chassis.	58
Figura 70 - Sistema de extrusão.	59
Figura 71 - Detalhe do bico extrusor, mostrando os canais de montagem da resistência de aquecimento e do termistor.....	59
Figura 72 - Detalhe de montagem do alimentador de filamento.	60
Figura 73 - Peça de ligação do extrusor ao efetor e detalhe de montagem.	61
Figura 74 - Montagem do canal de arrefecimento da peça.....	61
Figura 75 - Peça de montagem para os alimentadores e montagem dos alimentadores no topo da máquina.....	62
Figura 76 - Detalhe de montagem da base de impressão.	63
Figura 77 - Componentes eletrónicos selecionados para o controlo da impressora.	64
Figura 78 - Ligações dos componentes eletrónicos à placa RAMPS 1.4 com um microcontrolador Arduino Mega 2560.	65
Figura 79 - Localização dos diferentes componentes eletrónicos na máquina.....	67
Figura 80 - Fonte de alimentação de 12V com uma potência de 360W [107].	68
Figura 81 - Fim-de-curso e detalhe do seu acionamento ao contactar o carril.....	69
Figura 82 - Painel de controlo.	69
Figura 83 - Edição do firmware Marlin a partir do IDE do Arduino.	70
Figura 84 - Tela principal do sistema de controlo da impressora (firmware Marlin).	71

Figura 85 - Geração do código de impressão através do software Cura e impressão por FDM dos cantos superiores do chassis.....	72
Figura 86 - Impressora FDM Prusa I3 usada para a impressão dos componentes em PLA.	72
Figura 87 - Defeito de impressão nas peças impressas: furo com forma oval.	73
Figura 88 - Puncionadora CNC usada para o fabrico de peças em chapa: Wiedemann Magnum 2125 equipada com um sistema de controlo CNC Muratec.	73
Figura 89 - Chapa do painel de controlo antes e depois dos acabamentos.....	74
Figura 90 - Torneamento dos espaçadores cilíndricos.	74
Figura 91 - Corte dos painéis do chassis, em polietileno, por maquinaria CNC.	75
Figura 92 - Soldagem e proteção da junta com mangas termoretráteis, dos cabos dos fins-de-curso.....	75
Figura 93 – Montagem dos componentes eletrónicos na base do chassis.	76
Figura 94 - Colagem dos ímanes às junções dos braços e montagem do painel de conexões elétricas e USB.	77
Figura 95 - Montagens elementares feitas antes de passar à montagem final da impressora...77	
Figura 96 - Detalhes da impressora: a) impressora, b) alimentador de filamento, c) correia e topo do chassis, d) parafuso de ajuste da base de impressão, e) passagem da correia pelo painel da base do chassis, f) ligação da máquina a um programa de controlo por USB, g) rolamentos do carril, h) fixação da correia no carril, i) painel de controlo, e j) canto inferior do chassis..	78
Figura 97 - Montagem do extrusor no efetor.....	79
Figura 98 - Medição da tensão no controlador Allegro A4988.	79
Figura 99 - Método seguido para a calibração do alimentador de filamento.	80
Figura 100 - Medição da temperatura na peça de montagem do extrusor, quando este está a uma temperatura de 200°C	80
Figura 101 - Ciclo de aquecimento do extrusor (vermelho) e da base aquecida (azul) a partir de uma temperatura ambiente de 15°C (Criado com o programa Repetier-Host).....	81
Figura 102 - Pontos de interesse para efetuar a calibração da máquina.	82
Figura 103 - Verificações e afinações feitas antes de calibrar a máquina: a) perpendicularidade das torres; b) nivelamento da base de impressão; c) Afinação do comprimento dos braços; d) ajuste da altura dos fins-de-curso.	82
Figura 104 - Aproximação do extrusor à base de impressão utilizando um papel como verificação.	83
Figura 105 - Processo de calibração da máquina usando comandos em código G.	84
Figura 106 – Impressão e medição das arestas laterais de um cubo com 20mm de lado.	84
Figura 107 - Cilindro impresso com diferentes alturas de camada.	85
Figura 108 - Jarros (a) e (b) impressos a uma velocidade de 80mm/s e torre (c) impressa a uma velocidade de 150mm/s.	85
Figura 109 - Impressora 3D FDM do tipo delta desenvolvida e construída neste projeto.	87
Figura 110 - Coordenadas de interesse para calcular a posição do do efetor no espaço.	96
Figura 111 - Cálculo das coordenadas para os pontos A1 e A2 para uma posição genérica. ..	96
Figura 112 - Cálculo da relação entre as alturas dos carris e os pontos A, B e C.	97

Figura 113 - Peças em chapa de alumínio puncionadas por CNC.....	103
Figura 114 - Chapas dos carris, chapa do efetor e ponta dos braços	105
Figura 115 - Peças do painel de controlo e presilha de montagem da correia aos carris.	106
Figura 116 - Anel de montagem da base de impressão, peças o canal de arrefecimento da peça e medida dos tubos usados nos braços e espaçadores dos carris.	107
Figura 117 - Cantos de cima e de baixo e peça de montagem dos fins-de-curso	108

Índice de tabelas

Tabela 1 - Temperaturas de extrusão para alguns dos materiais usados em impressão 3D por FDM [21].	11
Tabela 2 - Características de alguns softwares de CAM e controlo para impressão FDM.	14
Tabela 3 - Comparação entre várias características de robôs série e paralelo (adaptado de [40]).	20
Tabela 4 – Características-alvo estabelecidas para a impressora.	38
Tabela 5 - Fator de multiplicação em função de vários valores de alfa.	44
Tabela 6 - Principais dimensões da máquina estabelecidas.	47
Tabela 7 – Previsão das massas para os componentes que compõem a o conjunto móvel.	51
Tabela 8 - Cálculo da força resultante no efetor.....	52
Tabela 9 - Cálculo da força resultante num dos carris.	53
Tabela 10 - Binário disponível e resolução linear teórica para um sistema de transmissão acionado por um motor de passo com 200 divisões e um sistema de polias GT2 com 20 dentes, controlados por diferentes modos de microstepping.	54
Tabela 11 - Cálculo do binário.	55
Tabela 12 - Componentes eletrónicos e respetivas potências.....	67
Tabela 13 - Parâmetros dos controladores dos motores de passo.....	80
Tabela 14 - Características da impressora delta desenvolvida e construída neste projeto.	87
Tabela 15 – Proposta para trabalhos futuros de modo a explorar funcionalidades e otimizar as características da impressora desenvolvida.	89
Tabela 16 - Lista de componentes adquiridos no mercado.	104

Siglas

3D – Tridimensional/ três dimensões

ABS – Acrilonitrilo butadieno estireno

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer-Aided Design*

CAM – *Computer-Aided Manufacturing*

CNC – Comando Numérico Computorizado ou *Computer Numeric Control*

DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica

EEPROM - *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*

EUA – Estado Unidos da América

FA – Fabrico aditivo

FDM – *Fused Deposition Modelling*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

GPL – *General Public License*

HIPS – Poliestireno de alta resistência ao impacto

IDE – *Integrated Development Environment*

INEGI – Instituto de Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

LCD – *Liquid Crystal Display*

LDM – *Liquid Deposit Modelling*

LDPS – Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços

LED – *Light Emitting Diode*

MA – Manufatura aditiva

NEMA – *National Electric Manufacturers Association*

NTC – *Negative Temperature Coefficient*

OSHOWA – *Open Source Hardware Association*

PCB – *Printed Circuit Board*

PET – Politereftalato de Etileno

PETG - Politereftalato de Etileno-Glicol

PI – Poli-Ímida

PID – Proporcional, Integrativo, Derivativo

PLA – Ácido poliláctico

POM – Polioximetileno ou acetal

PTFE - Politetrafluoretileno

PVA – Acetato de polivinilo

PWM – *Pulse Width Modulation*

RAMPS – RepRap Arduino Mega Pololu Shield

RepRap - Replicating Rapid Prototyper

SCARA – Selective Compliance Articulated Robot Arm

SD – Secure Digital

STL – Standart Tessellation Language / Standart Triangle Language

USB – Universal Serial Bus

UV – Ultravioleta

Lista de símbolos

α – Ângulo formado entre os braços e o efetor

β – Ângulo formado entre os braços e o carril

d – Distância entre braços

D_I – Diâmetro de impressão

D_M – Diâmetro da máquina

H – Comprimento das torres

h – Altura de impressão

l – Comprimento dos braços

O_C – *Offset* do carril

O_E – *Offset* do efetor

1. Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O desenvolvimento de uma impressora FDM do tipo delta vem na sequência de poder oferecer uma nova ferramenta à secção de fabrico aditivo do Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços do DEMec. Para além do seu modo de funcionamento distinto, esta impressora servirá para colmatar algumas das limitações dos equipamentos presentes neste laboratório e possibilitar impressões de peças altas e impressão multimaterial.

As impressoras delta têm vindo a receber um maior interesse dos fabricantes e usuários de impressoras 3D de baixo custo pelas suas características de funcionamento, nomeadamente as suas velocidades de operação e precisão de posicionamento.

A motivação pessoal por este tema adveio do interesse nas tecnologias CNC e processos de fabrico relacionados. A impressão 3D inclui-se neste grupo e tem vindo a receber cada vez mais atenção nos últimos anos. As impressoras 3D FDM são bastante versáteis com aplicações nas mais diversas áreas da engenharia, sobretudo na conceção de novos produtos.

O projeto aliou o processo criativo com uma componente prática, o que foi uma razão adicional para o interesse no tema.

1.2 O Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços

Este laboratório foi criado com o principal objetivo de auxiliar a FEUP e empresas exteriores no desenvolvimento de novos produtos e serviços. O contexto académico em que se insere fornece várias vantagens, valorizando e pondo em prática os conhecimentos dos estudantes.

As ferramentas de fabrico aditivo presentes neste laboratório permitem uma melhor comunicação de ideias e conceitos entre os responsáveis pelo desenvolvimento dos produtos e os seus clientes. Ao mesmo tempo, estes equipamentos são ferramentas e alvos de investigação académica proporcionando um maior conhecimento e experiência à comunidade da FEUP na área da manufatura aditiva.

1.3 Objetivos do projeto

O objetivo deste projeto foi o desenvolvimento e construção de uma impressora FDM tipo delta com um extrusor multimaterial usando soluções de baixo custo e apoiando-se em tecnologias *open-source*. Para tal foi necessário compreender aspetos relacionados com o processo de fabrico aditivo (FA), com as características de funcionamento deste tipo de máquinas e os seus aspetos construtivos.

Desta forma, os principais objetivos foram:

- Compreender o funcionamento de impressoras 3D FDM, dando ênfase às impressoras do tipo delta;
- Estabelecer um conjunto de ferramentas para auxiliar no dimensionamento da impressora;
- Desenvolver e selecionar componentes para a impressora;
- Fabricar os componentes desenvolvidos;
- Montar, calibrar e testar a impressora.

1.4 Metodologia

Em primeiro lugar fez-se uma revisão bibliográfica para analisar e contextualizar a impressão 3D, referenciando algumas das suas principais aplicações na indústria, educação e investigação.

De seguida fez-se uma análise do processo de impressão por FDM em que se verificou o porquê de ser o processo de eleição para impressoras de baixo custo. Revelou-se alguns dos detalhes de operação e preparação de peças para serem impressas por este processo. Foram apresentadas algumas das inovações que investigadores e fabricantes têm vindo a explorar relacionados com este processo de FA.

Fez-se um levantamento dos tipos de impressoras existentes, comparando-as quanto à sua cinemática no contexto da robótica. Apresentou-se a história e aplicações dos robôs delta que serviram de inspiração para as impressoras delta lineares usadas em impressão 3D. Fez-se uma análise do seu funcionamento e salientou-se alguns dos componentes típicos para estes tipos de impressora. Por fim, mostrou-se algumas impressoras delta existentes no mercado com algumas características inovadoras.

Estipulou-se um conjunto de requisitos necessários para a impressora a desenvolver e, após a análise das características de impressoras delta existentes no mercado, foi possível estabelecer um conjunto de métricas essenciais para o dimensionamento da mesma.

Desenvolveram-se diversas relações geométricas que permitiram o cálculo das dimensões da impressora. Para a fase de desenvolvimento desenhou-se os componentes com um *software* de CAD. Este método permitiu iterar as melhores soluções para os desenhos das peças e ao mesmo tempo verificar o funcionamento das partes móveis da impressora. A partir dos desenhos virtuais preparou-se o fabrico através de *softwares* de CAM, impressão por FDM, funcionamento e maquinação por CNC.

Por fim, foi feita a sua montagem, calibração e teste através da impressão de algumas peças. Conclui-se que o funcionamento da impressora foi o esperado e que as peças seleccionadas e desenvolvidas foram adequadas para o projeto. Os erros dimensionais para as peças testadas foram na ordem das centésimas de milímetro e a altura de camada mais baixa testada foi de 100µm. Para impressões a velocidades de 80mm/s foi possível preservar detalhes finos. O mesmo não sucedeu para impressões a velocidades de 150mm/s.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos:

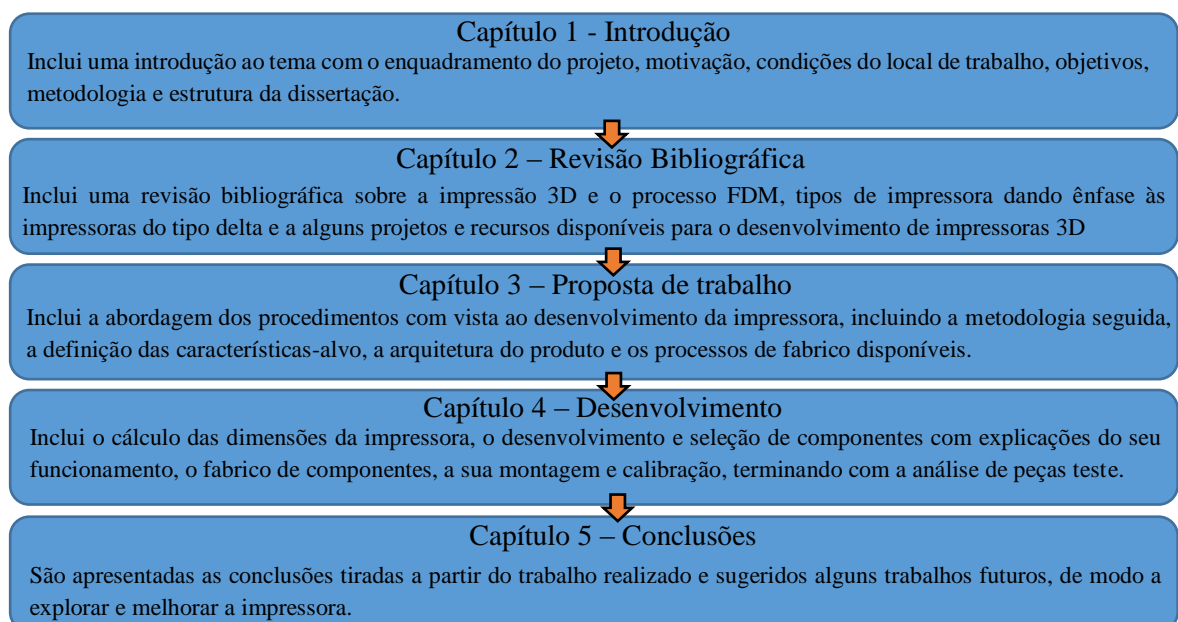


Figura 1 – Estrutura da dissertação.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 A impressão 3D

A impressão 3D é o termo usado correntemente para descrever processos de manufatura aditiva. Segundo a designação ISO/ASTM 52900, os processos de manufatura aditiva podem ser descritos como qualquer processo de fabrico de junção de materiais para o fabrico de peças a partir de modelos 3D, mais frequentemente camada a camada, em oposição aos processos de manufatura subtrativa [1] (fig. 2). Outros termos usados para descrever este processo são, por exemplo, *solid freeform fabrication* [2] ou *additive layer manufacturing* [1].

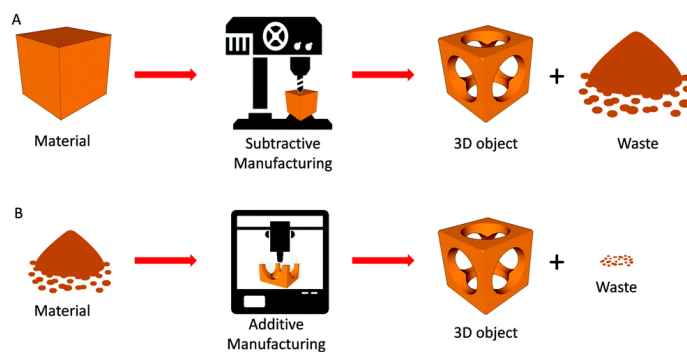


Figura 2 - Comparação entre processos de manufatura subtrativa (A) e manufatura aditiva (B) [3].

O desenvolvimento desta técnica de fabrico começou a ser estudada na década de 70 e na década seguinte, o primeiro método de fabrico aditivo foi patenteado por Chuck Hull da companhia *3D Systems*. O processo, chamado SL (estereolitografia), consiste na utilização de uma emulsão fotopolimerizável para a criação de objetos 3D. Baseava-se em usar uma fonte de luz UV para polimerizar camadas sucessivas de material, formando o objeto desejado. As primeiras máquinas que usavam este processo começaram a ser comercializadas no final da década de 80. A par desta tecnologia foi desenvolvido um novo formato digital para modelos 3D chamado STL que remete para o nome “*Stereolithography*”. Após a difusão deste formato, foram adaptados novos significados para a sigla tal como *Standart Triangle Language* e *Standart Tesseleation Language* [4].

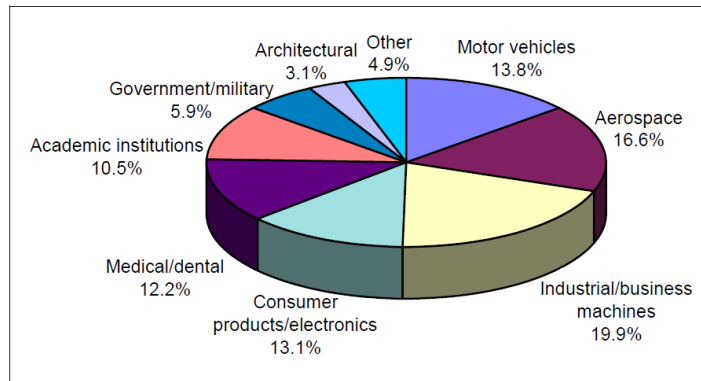
Este novo método de fabrico apresentou um grande potencial e eventualmente foram desenvolvidas novas técnicas para a produção de modelos 3D. Processos de laminação, fusão e extrusão permitiram a produção de objetos em outros materiais poliméricos, metálicos, cerâmicos e compósitos [1].

Estas inovações e a difusão das tecnologias de impressão 3D despertaram o interesse nas mais variadas áreas por ser um poderoso auxiliar na criação de novos produtos. A utilização destes processos confere várias vantagens competitivas em fases distintas de desenvolvimento de produtos, desde a sua prototipagem e teste e até mesmo na produção de peças para uso final. Consequentemente, é possível a diminuição do tempo de desenvolvimento e realizar alterações de um determinado *design* sem grandes custos associados; um aspeto muito benéfico para lidar com a atual competição no mercado [2, 5, 6]. Modelos produzidos por manufatura aditiva são também uma mais-valia na apresentação e visualização de protótipos, úteis na comunicação entre empresas e clientes. O custo por peça é independente da quantidade produzida, o que torna este processo ideal para a produção de peças únicas ou com características personalizadas. No entanto deixa de ser uma opção viável para a produção de grandes séries de peças [7].

Os equipamentos usados em manufatura aditiva apresentam um grau elevado de automação, o que significa que requerem pouca interação humana. Dependendo das peças, a

sua preparação para o processo de impressão através de um *software* de CAM é relativamente fácil e rápida, quando comparada com processos de maquinagem, por exemplo. As peças impressas requerem poucos ou nenhuns acabamentos, dependendo da sua finalidade.

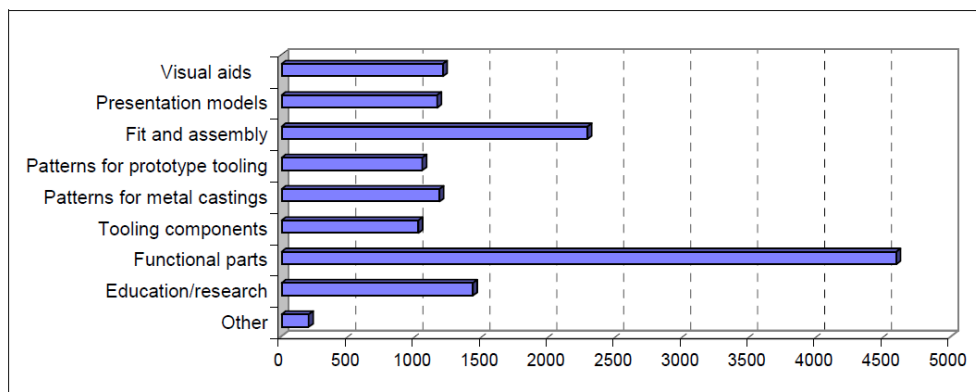
Pelo facto de ser possível a produção de peças com geometrias complexas, impossíveis de obter por outros processos de fabrico, desencadeou-se uma revolução no *design* em áreas tão distintas como as artes, arquitetura, medicina e engenharia [1, 2, 8-11] (fig. 3). A indústria aeroespacial e as instituições académicas apresentaram um maior crescimento nos últimos anos na utilização deste equipamentos [1].



Source: Wohlers Associates, Inc.

Figura 3 - Áreas de utilização de equipamentos de manufatura aditiva.[3]

A principal função de modelos fabricados por manufatura aditiva está associada à prototipagem, desde modelos que auxiliam na visualização de conceitos, até partes funcionais para serem usadas na sua aplicação final (fig. 4). A conceção de moldes para ferramentas e para processos de fundição é também uma aplicação possível para peças impressas [12-14].



Source: Wohlers Associates, Inc.

Figura 4 - Principais aplicações de peças produzidas por manufatura aditiva.[1]

Nos últimos anos tem havido um grande crescimento do número de utilizadores de tecnologias de manufatura aditiva. Estes utilizadores não se limitam apenas a grandes companhias ou centros de investigação, tendo-se observado um crescente interesse do público em geral [10]. Este fenómeno só se tornou possível através da redução dos custos dos equipamentos e de operação, colocando processos de manufatura aditiva ao alcance de pequenas empresas e utilizadores domésticos.

O processo FDM, *Fused Deposition Modelling*, é o processo mais adotado para este tipo de equipamentos. Possibilita a impressão de peças poliméricas com características aceitáveis para a maior parte das aplicações a que são destinadas. A sua difusão fez também com que ocorresse uma evolução conjunta em termos dos próprios equipamentos, materiais e *softwares* de CAM e controlo.

2.2 O processo FDM

Esta tecnologia foi desenvolvida e patenteada no final dos anos 80 por S. Scott Crump, co-fundador da companhia Stratasys. Desde então, a companhia deteve o monopólio na produção e desenvolvimento de impressoras deste tipo. O termo análogo, *Fused Filament Fabrication* (FFF) foi usado por entusiastas e investigadores desta tecnologia para contornar as suas restrições de utilização.

Com a expiração da patente, em 2009, o custo das impressoras FDM baixou radicalmente, de mais de 10000 dólares para menos de 1000 dólares americanos [15]. Segundo a classificação de Wohlers [1], as impressoras de baixo custo ou as chamadas “*desktop 3D printers*” referem-se a todos os equipamentos de manufatura aditiva com um custo máximo de 5.000 dólares. Hoje em dia, o processo FDM é o processo de eleição para impressoras desta categoria [1]. Nos últimos anos tem-se observado um grande crescimento no volume de vendas destas máquinas (fig. 5).

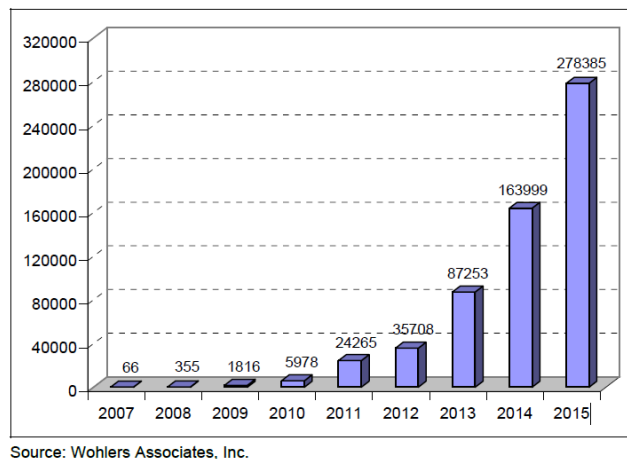


Figura 5 - Volume de vendas de impressoras de baixo custo [1].

2.2.1 Descrição do processo

Segundo a norma ASTM F2792, esta tecnologia inclui-se no grupo de processos de manufatura aditiva (MA) por extrusão de material. Este grupo abrange qualquer processo em que o material é dispensado seletivamente por um bocal ou orifício [16].

O princípio base de operação consiste em depositar material polimérico fundido, camada a camada, criando um objeto tridimensional com a geometria desejada (fig. 6). O bico extrusor contém uma fonte de calor com controlo de temperatura e é responsável por aquecer e alterar o estado físico do material. O material consumível vem na forma de uma bobina de filamento. Após o depósito do material e a sua solidificação por arrefecimento, este servirá de suporte para a camada seguinte de material. O movimento relativo entre o bico extrusor e a base de impressão é controlado através de um sistema de movimentação computadorizado, em que as instruções são criadas a partir do modelo 3D virtual.

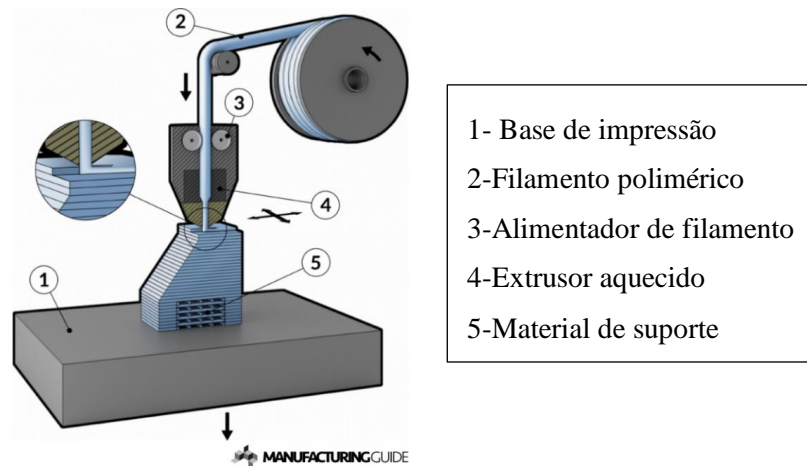


Figura 6 - Processo de impressão FDM [17].

2.2.2 Materiais

O desenvolvimento de materiais para a impressão 3D tem despertado o interesse de um grande número de empresas do ramo. Foi considerada uma das áreas em que o seu avanço apresentará os resultados mais promissores a nível de mercado nos próximos anos [18]. Entre os principais objetivos dos fabricantes de materiais para esta aplicação estão o melhoramento das características mecânicas e diminuição das suas expansões térmicas.

O modo mais comum de fornecimento de material é na forma de bobinas de filamento com 1.75 ou 3mm de diâmetro, vendidas ao peso. Os filamentos são práticos de usar pois simplificam o sistema de extrusão das impressoras e requerem pouca manutenção.

Os termoplásticos de utilização mais corrente nos processos de FDM são o PLA e o ABS [19]. Por norma o PLA é mais fácil de trabalhar pois não é tão sensível a alterações de temperatura como o ABS. Desta forma, o PLA é mais adaptado para principiantes na impressão 3D por este processo. Este material é um bioplástico o que significa que é composto por carbono proveniente de fontes renováveis a partir de processos biológicos [20]. O PVA é um termoplástico solúvel em água o que o torna ideal para a produção dos suportes das peças. Outros termoplásticos como o PETG, HIPS e PC são também alguns dos materiais usados neste processo. A tabela 1 apresenta algumas das temperaturas típicas de extrusão para diferentes termoplásticos [21].

Tabela 1 - Temperaturas de extrusão para alguns dos materiais usados em impressão 3D por FDM [21].

Material	Temperatura de extrusão (°C)
PLA	180-210
ABS	185-235
PVA	180-200
PETG	220
HIPS	235
PC	280-305

Existe, atualmente, uma grande variedade de materiais não convencionais referidos informalmente por materiais exóticos [19] que vão desde materiais flexíveis, a compósitos com as mais variadas combinações (fig. 7; b e c). Para sistemas convencionais de extrusão existem

filamentos compósitos com fibras curtas de vidro ou carbono. Outros compósitos tentam emular o aspeto e comportamento de materiais metálicos ou madeiras. Filamentos de materiais poliméricos fluorescentes, transparentes e até condutores de eletricidade fazem também parte deste grupo de materiais experimentais.

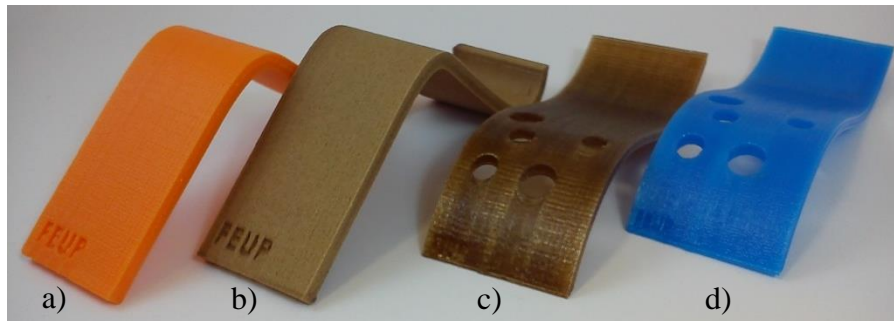


Figura 7 - Impressão FDM de diferentes materiais. a) PLA, b) PLA com partículas de madeira, c) PLA com partículas de café, d) ABS.

2.2.3 Parâmetros de impressão

Os parâmetros de impressão FDM dizem respeito às variáveis do processo, tal como a velocidade de impressão e a temperatura de extrusão, assim como aspetos relacionados com a preparação da peça para o processo de impressão.

As velocidades típicas de impressão rondam os 60mm/s, havendo alguns equipamentos capazes de atingir velocidades superiores. A temperatura de extrusão depende sobretudo do material a imprimir. Sendo o PLA o material mais comum em impressão, a maior parte dos extrusores conseguem atingir temperaturas de, pelo menos, 200°C [21].

No que diz respeito ao processo de preparação das peças para a impressão, cabe ao utilizador definir outros parâmetros importantes como a altura de camada, a percentagem de enchimento, a possibilidade de adição de suportes ou outros elementos necessários para a impressão de peças com sucesso.

2.2.3.1 Altura da camada

A altura da camada é uma variável do processo que pode ser alterada pelo utilizador, de acordo com as características da máquina. Uma altura de camada baixa origina peças com melhor acabamento e uma maior fidelidade ao modelo virtual (fig. 8). A altura de camada deve ainda ser escolhida tendo em conta a espessura do filamento, diâmetro do bico extrusor e velocidade de impressão.

A altura de camada mínima para impressoras FDM varia entre os 20µm e os 300µm [1]. Atualmente a maior parte dos equipamentos no mercado imprime com alturas de camada por volta dos 100µm. Este valor costuma ser um dos parâmetros mais usados para a qualificar a resolução destas impressoras em detrimento da resolução de posicionamento do extrusor.

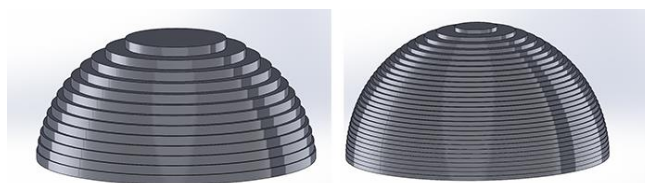


Figura 8 - Influência da altura de camada no acabamento de uma semiesfera [22].

2.2.3.2 Enchimento

O enchimento diz respeito à quantidade de material usada no interior de uma peça e é quantificada pela sua percentagem (fig. 9). O critério de escolha de enchimento de uma peça está diretamente associado à rigidez desejada para peça, quantidade de material, peso e tempo de impressão. Existem ainda diversos padrões de enchimento que conferem à peça diferentes comportamentos mecânicos [21, 23, 24].

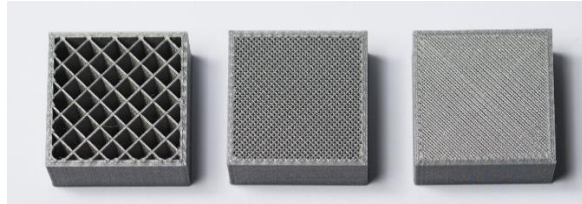


Figura 9 - Peça com diferentes percentagens de enchimento [24].

2.2.3.3 Adição de suportes

Em grande parte dos processos de MA pode haver a necessidade de adição de material de suporte. Este artifício consiste na impressão de uma estrutura física para suportar camadas superiores se a geometria da peça assim o exigir (fig. 10). Estas estruturas podem ser impressas com o mesmo material da peça e removidos manualmente após a impressão. Em alternativa podem ser impressos em PVA desde que a máquina esteja equipada com um extrusor multimaterial.

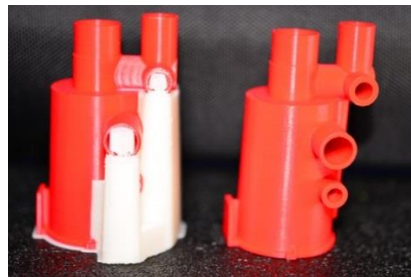


Figura 10 - Peça produzida por FDM com material de suporte em PVA [25].

2.2.3.4 Outros elementos

Para além dos parâmetros apresentados acima, existem outros elementos úteis para a impressão de peças por FDM. Entre estes, os mais importantes são a adição de outros elementos de impressão tais como “*skirts*” ou “*brims*”, que não fazem parte da geometria do modelo 3D. O primeiro consiste na extrusão de material na superfície de impressão em torno do perímetro da peça (fig. 11 a). Desta forma é possível garantir que o extrusor está a extrudir o material corretamente e que a impressão da peça pode ser iniciada. Os *brims* consistem na impressão de uma camada com uma área superior à da superfície de contacto da peça (fig. 11 b). O principal objetivo desta primeira camada é ajudar na adesão da peça à superfície de impressão. Após a impressão, esta camada pode ser facilmente removida da base da peça.

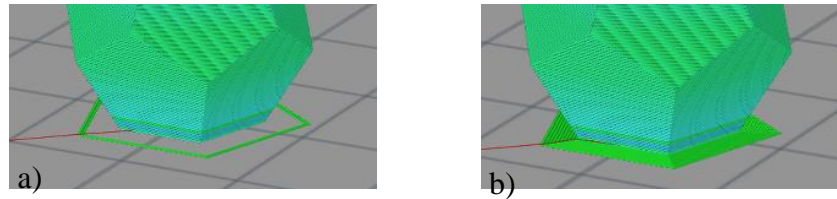


Figura 11 – Elementos adicionados em impressões FDM a partir de *softwares* de CAM; a) skirt e b) brim [26].

2.2.4 Softwares de CAM e de controlo

Todos os parâmetros de impressão apresentados podem ser editados a partir de *softwares* de CAM ou de controlo. Hoje em dia existe uma grande diversidade de *softwares* deste tipo, desenvolvidos especificamente para trabalharem com este processo de fabrico. No contexto do processo FDM, estes são conhecidos por “*slicers*” por fazerem o “fatiamento” dos sólidos para os imprimir camada a camada (fig. 12). O *software* cria um ficheiro em código g que contém todos os parâmetros e instruções de impressão, pronto para ser interpretado e corrido por uma máquina. Estes ficheiros são semelhantes aos usados em outros equipamentos CNC mas adaptados às funcionalidades destas impressoras 3D.

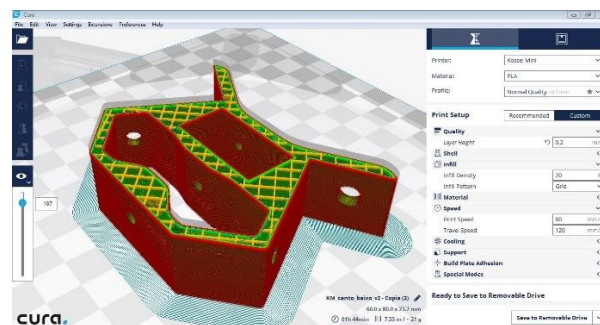


Figura 12 - Preparação de uma peça para impressão por FDM através de um *software* de CAM Cura.

Alguns destes *softwares* permitem ainda o controlo da impressora a partir de uma conexão de dados. Esta funcionalidade torna possível o envio de comandos e a monitorização do processo de impressão em tempo real, a partir de um computador.

Existe uma grande variedade de *softwares* de CAM e com vários níveis de complexidade na edição dos parâmetros de impressão. Muitos destes *softwares* são livres o que é uma mais-valia para utilizadores domésticos.

A tabela 2 apresenta alguns *softwares* usados em processos FDM indicando algumas das suas principais características.

Tabela 2 - Características de alguns *softwares* de CAM e controlo para impressão FDM.

<i>Software</i>	CAM	Controlo	Tipo	Nível
Repetier-Host	Sim	Sim	Livre ou Pago	Médio
Cura	Sim	Não	Livre	Básico
Pronterface	Não	Sim	Livre	Básico
Slic3r	Sim	Não	Livre	Médio
Simplify3D	Sim	Sim	Pago	Profissional

2.2.5 Custos de operação

Os custos de operação para este processo podem variar consideravelmente. Os fatores que mais influenciam no custo final de uma peça impressa são a preparação do modelo, o tipo e quantidade de material usado, o tempo total de impressão e os possíveis acabamentos (fig. 13).

A preparação consiste em fazer alguma possível alteração da geometria ou segmentação do modelo e preparar para imprimir a partir de um *software* de CAM. No tempo de impressão podem estar implícitos custos de aluguer do equipamento ou custos energéticos, por exemplo. Entre os processos de acabamento podem ser incluídas operações de lixagem, desbaste, pintura ou outros tratamentos superficiais como tratamentos com vapor de acetona [19]. Os custos de material podem variar consideravelmente, dependendo do tipo, qualidade ou fornecedor do mesmo. De forma geral, os materiais para este tipo de impressoras podem ser adquiridos a partir de 20€/kg.

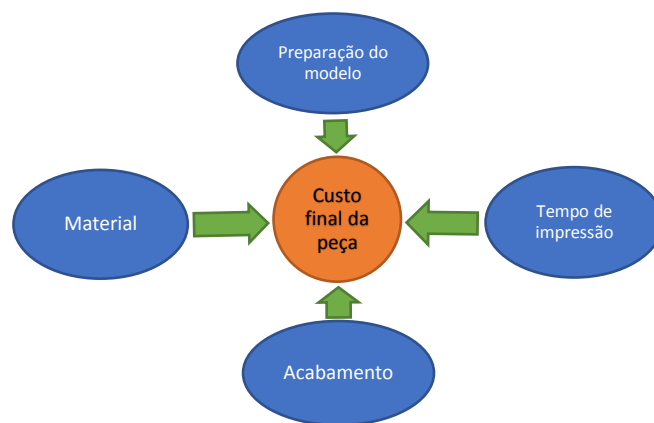


Figura 13 - Fatores que influenciam no custo final de uma peça produzida por FDM.

2.2.6 Vantagens e desvantagens

Vantagens

Custo de investimento e operação – São máquinas que requerem investimentos relativamente baixos, tornando-as ideais para a integração em ambientes académicos ou pequenas empresas. O preço destas impressoras pode ir dos 500 aos 5000€ para modelos de baixo custo [1].

Disponibilidade de mercado – A gama existente no mercado é muito variada, existindo impressoras para utilizadores casuais ou profissionais. A disponibilidade e variedade de equipamentos e materiais em lojas de cariz tecnológico é cada vez maior [17].

Comunidades – Existe uma grande comunidade ativa de entusiastas de impressoras FDM [27]. Há, portanto, uma plataforma de discussão e troca de conhecimento muito rica e atualizada que acaba por fornecer um tipo de suporte à utilização de equipamentos de impressão FDM.

Desvantagens

Qualidade de impressão – Em relação a outros tipos de MA, a qualidade de impressão das peças deixa algo a desejar. A rugosidade é elevada e apresentam limitações quanto à complexidade e tamanho mínimo das geometrias impressas [28].

Materiais – A maior parte dos materiais que imprimem são termoplásticos. Apesar de muito polivalentes, as aplicações das peças impressas estão limitadas pelas suas características mecânicas e propriedades físicas.

2.2.7 Inovações

A grande difusão deste processo na impressão 3D abriu caminho a várias inovações de modo a lidar com as suas limitações, sobretudo relacionadas com as propriedades mecânicas das peças, tempo de impressão, fidelidade ao modelo virtual e impressão multimaterial.

De seguida, apresentam-se algumas técnicas e funcionalidades propostas por investigadores e fabricantes de equipamentos para tornar este processo ainda mais competitivo em relação às alternativas.

2.2.7.1 Técnica de enchimento compósita

Esta técnica, proposta e testada experimentalmente por investigadores da universidade de Yale nos EUA, consiste em reforçar peças impressas por FDM com resinas de alta resistência. As peças são impressas ocas ou com uma baixa percentagem de enchimento. Os vazios interiores são ocupados pela resina líquida que depois de curada aumenta a rigidez da peça (fig. 14).

Esta investigação contou também com a análise de diferentes geometrias e posicionamentos destes vazios de modo a otimizar as peças para os tipos de solicitações mecânicas a que serão sujeitas.

Estes investigadores concluíram que é possível um aumento da tensão de rotura na ordem dos 45% e um aumento de 25% na rigidez das peças [29].

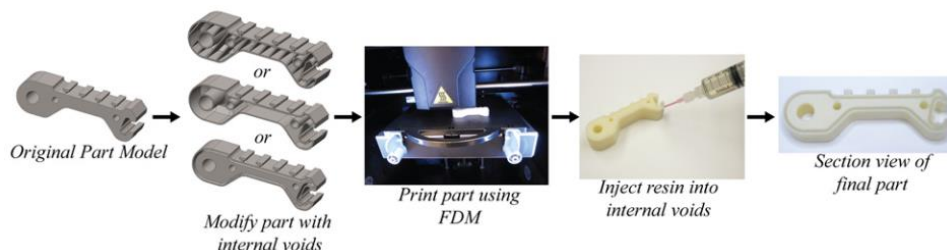


Figura 14 - Sequência de produção de uma peça pelo método de “Fill Compositing Technique” [29].

2.2.7.2 FDM com camadas não planares

Também conhecida por *Curved Layer Fused Deposition Modelling*, esta técnica consiste na deposição de material em camadas não planares e com espessuras não uniformes (fig. 15) [30]. Este processo tira partido da capacidade que a maior parte das impressoras têm em se mover nos três eixos cartesianos de forma simultânea.

Uma das principais vantagens é a melhoria do comportamento mecânico das peças na direção do eixo vertical. Ao variar a inclinação das camadas é possível reduzir as tensões perpendiculares às camadas de material. Outra vantagem está relacionada com a diminuição da rugosidade das superfícies originando uma peça com uma geometria mais fiel ao seu modelo virtual.

A geometria do bico extrusor é um fator crítico para esta técnica porque limita a inclinação máxima que é possível atingir sem que haja contacto entre o bico extrusor e a peça.

Embora seja possível um aumento do comportamento mecânico em comparação com o processo FDM convencional o tempo de impressão é mais demorado [31].

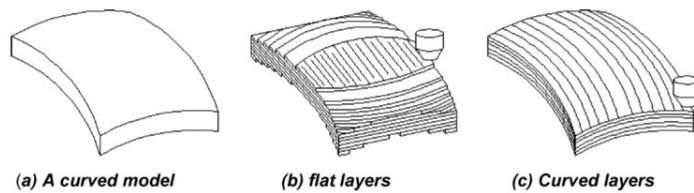


Figura 15 - Ilustração da técnica de *Curved Layer Fused Deposition Modelling* [30].

2.2.7.3 Reforço com fibras contínuas

Hoje em dia é possível adquirir filamentos poliméricos com fibras curtas de vidro ou carbono na maior parte das lojas especializadas em impressão 3D. No entanto, a utilização de fibras curtas não permite tirar total partido das suas características mecânicas.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos sistemas que permitem a deposição fibras contínuas em processos de impressão FDM. Um grupo de investigadores japoneses desenvolveu e testou um sistema de extrusão capaz de impregnar e posicionar fibras longas durante o processo de impressão (fig. 16). Concluíram que é viável a utilização até 50% em volume de fibras e que é possível duplicar a resistência mecânica comparando com provetes impressos por FDM convencional [32].

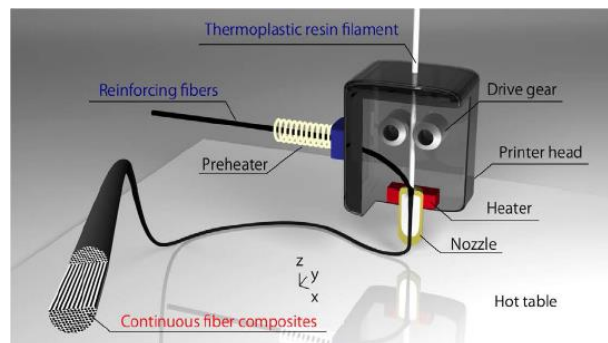


Figura 16 - Sistema de extrusão com fibra contínua [32].

A companhia americana *Markforged* comercializa impressoras que usam um conceito semelhante. A empresa desenvolveu também um *software* CAM proprietário especializado para este processo. As suas máquinas permitem usar fibras de carbono, de vidro e de *Kevlar*.

2.2.7.4 Impressão multimaterial

A impressão multimaterial refere-se ao método de impressão de diferentes materiais num modelo, útil para conferir à peça final diferentes características mecânicas ou cromáticas. A implementação destes sistemas está ainda a ser alvo de melhorias e inovações com o objetivo de aumentar a sua fidelidade e facilidade de utilização.

Existem dois métodos distintos de impressão multimaterial: utilização de bicos de extrusão independentes ou utilização de um único bico extrusor que permite a mistura de diferentes materiais. Ambos apresentam suas vantagens e desvantagens. Os extrusores de mistura, por exemplo, necessitam de efetuar um ciclo de limpeza no momento de mudança de material, de modo a evitar misturas indesejáveis. Desta forma há uma porção de material que é desperdiçada durante este procedimento. Por outro lado, permitem misturar materiais em diferentes proporções obtendo modelos com características intermédias, o que é útil para fazer, por exemplo, gradientes de cores. No caso dos bicos de extrusão independentes, não é necessário fazer a sua limpeza quando ocorre a mudança de material na impressão de uma peça.

No entanto, a afinação dos bicos de extrusão pode ser um processo difícil. O facto de usar dois extrusores aquecidos implica também mais energia despendida para os aquecer.

As últimas versões das impressoras *Prusa* (fig.17 a) e *Zmorph* (fig.17 b) têm vindo a explorar estas soluções nos seus aparelhos. A primeira usa apenas um bico extrusor alimentado por um filamento em que a rotina de mudança de filamento é automatizada [33]. As impressoras *Zmorph* são compatíveis com um extrusor de mistura de dois filamentos [34]. Os fornecedores de *software* CAM para impressoras 3D estão também sensibilizados para esta nova funcionalidade que está a ocorrer no mercado e a maior parte já oferece suporte para este tipo de impressões.



Figura 17 - Impressão multimaterial. a) impressora *Prusa I3 MultiMaterial* [33] e b) peças obtidas através de mistura de material por uma impressora *Zmorph* [34].

2.3 Tipos de impressoras

Existem diferentes tipos de impressoras FDM no que diz respeito ao modo de translação do extrusor no espaço. Grande parte dos seus sistemas de movimentação são inspirados noutros tipos de máquinas como por exemplo máquinas-ferramenta CNC para processos de maquinagem ou robôs industriais. A maioria das impressoras 3D FDM possui três graus de liberdade que é suficiente para o tipo de processo em questão.

O estudo dos tipos de cinemática destas máquinas pode ser feito no âmbito da robótica, que estuda os aspetos mecânicos e as diferentes soluções de controlo. As impressoras 3D são, por isso, alvo de estudo desta área científica.

2.3.1 Robótica

Impressoras FDM são na verdade máquinas-ferramenta em que a sua ferramenta é o extrusor de material. Podem também ser classificados como um robô industrial por serem usados em processos de manufatura. Estes tipos de robô são por vezes referidos como manipuladores. Nesta categoria incluem-se outros robôs que fazem operações de soldadura, montagem, movimentação de cargas, pintura e inspeção [35]. Grande parte dos sistemas de controlo neste tipo de robôs apoia-se na automação programável. Esta forma de controlo permite reprogramar o robô para executar uma determinada sequência de operações dando uma grande flexibilidade no fabrico de diferentes peças ou tipos de produtos. O controlo CNC é um exemplo deste tipo de automação [36, 37].

A forma como a ferramenta é posicionada no espaço depende da cadeia cinemática da máquina. Diferentes cinemáticas conferem características de funcionamento distintas. Em robótica existem duas classes de robôs, classificadas quanto ao seu tipo de cinemática: os robôs série e paralelos.

Os robôs série possuem uma cadeia cinemática aberta, o que significa que os movimentos, para cada um dos seus graus de liberdade são feitos de forma independente (fig. 18 a). Já os robôs paralelos apresentam uma cadeia cinemática fechada compostos por vários elementos mecânicos, ligados entre si, e acionados de forma sincronizada (fig. 18 b). De acordo com as expressões matemáticas que traduzem a cinemática do robô, é possível calcular a posição ou movimento da ferramenta em função do acionamento. Existem ainda robôs híbridos que combinam características dos dois tipos de cinemática.



Figura 18 - Robôs série e paralelos. a) Manipulador série do tipo SCARA [38] e b) Plataforma do tipo *Gough-Stewart*, um manipulador paralelo [39].

Dependendo da classe de robô, estes apresentam várias diferenças no que diz respeito ao seu volume de trabalho, capacidade de carga, aspetos relacionados com a dinâmica e com o posicionamento da ferramenta e a sua construção.

O volume de trabalho quantifica todo o espaço onde a ferramenta se pode movimentar. Para os robôs paralelos, o volume de trabalho é bastante limitado devido às suas cadeias cinemáticas fechadas, que limitam o alcance da ferramenta. Por consequência, o rácio entre o volume de trabalho e o volume que o robô ocupa é reduzido. Devido às relações geométricas destas cadeias cinemáticas, o volume de trabalho pode apresentar uma forma complexa.

No que diz respeito às capacidades de cargas na ferramenta, os robôs série estão limitados pelas forças máximas suportadas por cada atuador. Este aspeto torna estes robôs menos rígidos e mais suscetíveis à ocorrência de erros de posicionamento. Para os robôs paralelos, considerando uma determinada carga na ferramenta, estas forças são distribuídas pelas diferentes cadeias cinemáticas a elas ligadas [40].

A modelação dinâmica para robôs paralelos pode ser muito complicada devido à sua configuração mecânica complexa. Pelo facto dos acionadores poderem estar fixos no chassis ou na plataforma de montagem, a inércia da parte móvel da máquina pode ser reduzida [37]. Em combinação com os fatores de multiplicação dos seus movimentos, através da ligação de diferentes braços mecânicos, é possível atingir velocidades e acelerações elevadas.

Como o movimento da ferramenta para estes robôs é feito de forma conjunta, os erros de posicionamento podem ser minimizados. Isto significa que os erros de acionamento têm uma contribuição mais pequena no erro de posicionamento da ferramenta [41]. O contrário ocorre para robôs série em que os erros das juntas acumulam-se fazendo com que o erro de posicionamento seja amplificado. Por outro lado, estes são mais fáceis de calibrar devido à sua simplicidade construtiva.

Os robôs paralelos têm ainda a vantagem de apresentarem uma elevada uniformidade de componentes. Muitos deles são compostos por uma série de braços e acionadores iguais e a sua própria configuração mecânica possui vários planos de simetria.

A tabela 3 sintetiza várias características inerentes a cada uma destas classes de robôs.

Tabela 3 - Comparação entre várias características de robôs série e paralelo (adaptado de [40]).

Característica		Série	Paralelo
Volume de trabalho	Volume de trabalho	Grande	Pequeno e complexo
	Rácio entre volume de trabalho e tamanho do robô	Elevado	Baixo
Capacidade de carga	Carga máxima	Baixa	Elevada
	Rigidez	Baixa	Elevada
Dinâmica	Modelação dinâmica	Simples	Complexa
	Inércia	Elevada	Baixa
	Velocidade e aceleração	Baixa	Elevada
Posicionamento	Erro de posição	Acumulativo	Médio
	Precisão	Baixa	Elevada
	Calibração	Fácil	Difícil
Construção	Uniformidade de componentes	Baixa	Elevada

O tipo de impressoras FDM mais comum são as chamadas impressoras cartesianas (fig.189a). Estes equipamentos são manipuladores série e possuem três graus de liberdade acionados de forma independente. Outros tipos de impressoras baseadas neste tipo de manipuladores são as máquinas polares (fig. 19 b), que possuem dois graus de liberdade de translação em conjunto com um grau de liberdade rotativo e impressoras do tipo SCARA (fig. 19 c).

Na classe de manipuladores paralelos, a configuração mais adotada em impressoras é a configuração delta linear (fig. 20 a). Esta configuração tem vindo a receber mais atenção nos últimos tempos devido aos benefícios que apresenta em relação às impressoras cartesianas. As impressoras delta fazem o seu posicionamento nos três eixos cartesianos através de um conjunto de braços ligados a juntas lineares. As impressoras do tipo *CoreXY* (fig. 20 b) e do tipo SCARA paralelo (fig. 20 c) podem também ser incluídas nesta categoria, no entanto a movimentação no eixo z é feita de forma independente.

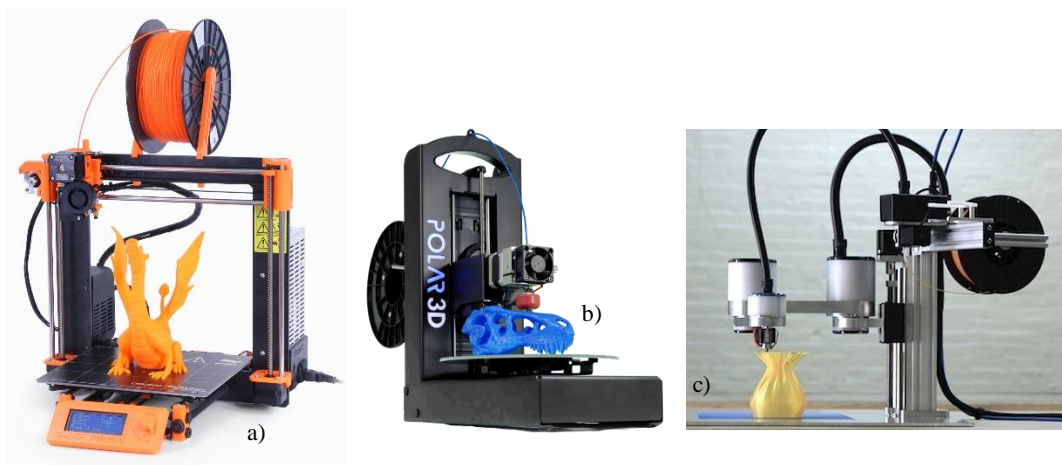


Figura 19 - Impressoras FDM baseadas em robôs série. a) Impressora cartesiana *Prusa I3*, b) Impressora polar *Polar 3D*, c) Impressora baseada num manipulador SCARA *FLX.ARM*.

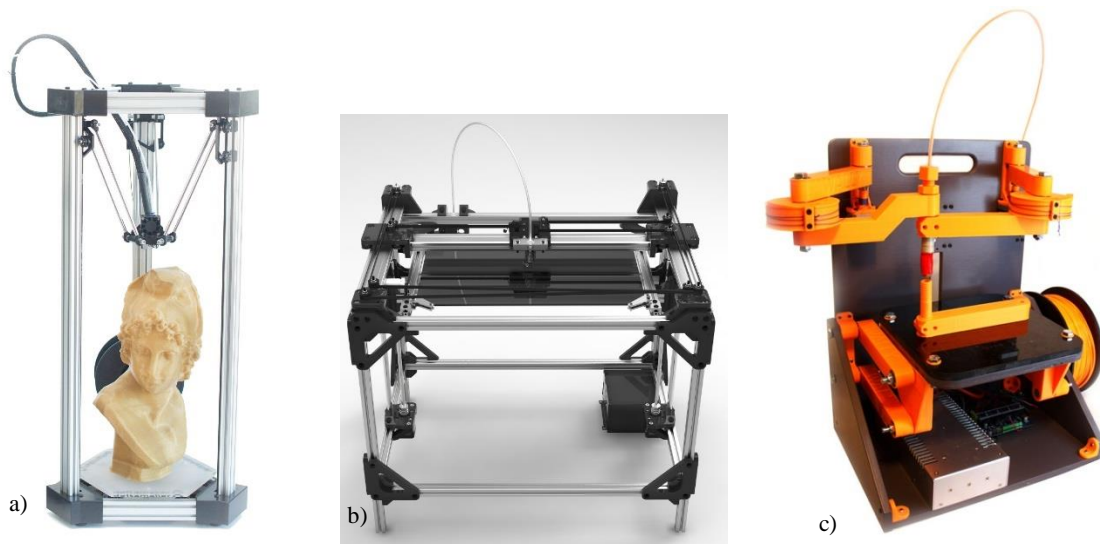


Figura 20 - Impressoras FDM baseadas em robôs paralelos. a) Impressora delta *DeltaMaker* [42], b) Impressora *CoreXY* [43] e c) Impressora SCARA paralelo *Wally* [44].

Em suma, qualquer sistema de posicionamento com pelo menos três graus de liberdade, pode ser adaptado para a impressoras 3D do tipo FDM. Muitas das configurações apresentadas foram desenvolvidas para outro tipo de aplicações industriais, como por exemplo a manipulação de objetos ou operações de maquinagem.

2.3.2 A configuração delta

A invenção do robô delta está atribuída ao suíço Reymond Clavel que, no início dos anos 80, desenvolveu um robô do tipo paralelo com três graus de liberdade de translação (fig. 21). A patente original descreve também um sistema de transmissão que permite a rotação da ferramenta [45, 46]. O mecanismo consiste numa plataforma fixa ligada por um conjunto de braços a um órgão terminal, chamado efetor. A esta peça, são acoplados três pares de braços que formam três paralelogramos independentes que restringem a rotação do efetor. As ligações entre os braços são feitas por rótulas ou juntas universais que transmitem o movimento. O acionamento é feito por três motores montados no topo ligados a uns braços rotativos.

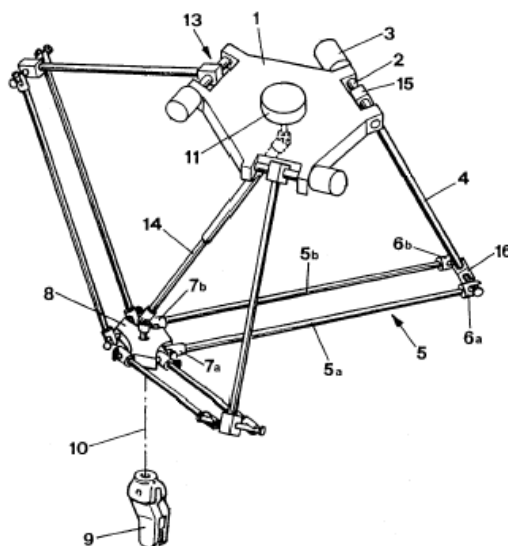


Figura 21 - Ilustração do robô delta na patente registada por Clavel [46]. 1) placa de montagem, 2) veio, 3) motor de acionamento, 4) braço rotativo, 5) braço do paralelogramo, 6) e 7) rótulas, 8) efetor e 9) ferramenta.

Os robôs delta começaram por ser implementados em ambientes industriais em unidades de embalagem para fazer operações de *pick-and-place* de pequenos objetos (fig. 22). São caracterizados, sobretudo, pela sua elevada precisão de posicionamento e velocidade de operação [47, 48].



Figura 22 - Robô delta em operação numa linha de produção a fazer operações de *pick-and-place* [47, 48].

Tal como foi referido anteriormente, este tipo de configuração cinemática apresenta características comuns aos robôs paralelos. Para além dos variados benefícios associados a estes tipos de cinemática, o facto de serem indicados para sistemas de movimentação em que as solicitações na ferramenta são muito baixas, tornaram-se ideais para serem adaptados em impressoras 3D.

Tomando como inspiração o robô delta, foram desenvolvidas diferentes variantes do modelo. Entre eles incluem-se os robôs delta lineares que, ao contrário do modelo desenvolvido por Clavel, o acionamento é feito através de juntas prismáticas (translação linear). Para impressoras 3D, em específico, esta translação é feita verticalmente. Este modo de funcionamento tem a vantagem de permitir o aumento da altura de trabalho através do aumento do curso linear destas juntas. O volume de trabalho para estas impressoras apresenta uma forma aproximadamente cilíndrica [49].

2.3.2.1 Impressoras 3D do tipo delta

Em impressoras 3D é mais comum o uso de uma variante deste tipo de robôs, os chamados robôs delta lineares que, ao contrário do modelo desenvolvido por Clavel, o acionamento é feito através de juntas prismáticas (translação linear) (fig.23). Esta translação é feita verticalmente por três carris, onde são montados os paralelogramos formados pelos braços. Esta vertente da configuração delta tem a vantagem de permitir o aumento da altura de trabalho através do aumento do curso ao longo destas torres. Estas torres verticais estão dispostas numa configuração triangular. Para o efector se mover no plano XY, é necessária a sincronização dos movimentos dos três carris. Para que o efector translade verticalmente, o movimento dos carris deve ser igual. O volume de trabalho para estas impressoras possui uma forma irregular, no entanto este pode ser aproximado a uma forma cilíndrica.

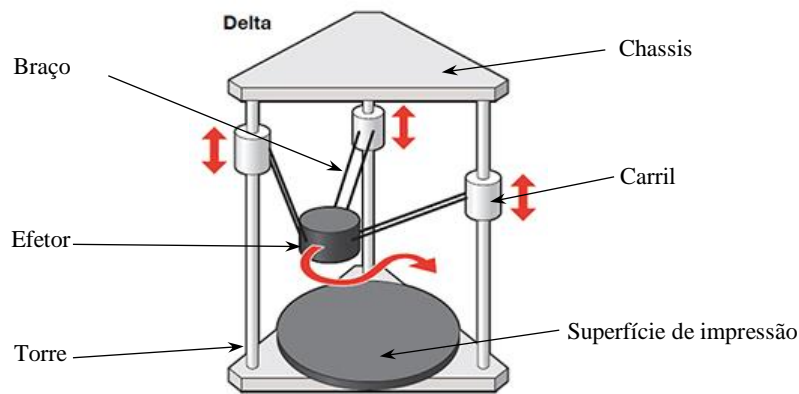


Figura 23 – Principais componentes e modo de funcionamento de uma impressora delta.

Em impressoras 3D FDM, o extrusor de material é montado no efector. Estas impressoras, apesar da sua cinemática complexa, trabalham com um sistema de eixos cartesiano. Para tal, o sistema de controlo tem que ser capaz de converter a posição desejada do extrusor em posições equivalentes dos três carris verticais. No anexo A, fez-se uma análise dos cálculos envolvidos nessa conversão. Estes cálculos apoiam-se, sobretudo, em entidades trigonométricas e têm em conta as medidas dos diferentes componentes cinemáticos. O ponto de coordenadas (0,0,0), num espaço cartesiano, é frequentemente considerado o centro da base circular de impressão.

Visto que as primeiras impressoras delta tiveram um carácter experimental, estas foram adaptadas usando peças e sistemas de controlo comuns a outros tipos de impressoras. Por esta razão, as três juntas prismáticas são frequentemente referidas por X, Y e Z embora não representem os movimentos nessa direção cartesiana. Para evitar essa confusão, podem ser denominadas por A, B e C, respetivamente. À parte do sistema de movimentação, que é único para as impressoras delta, os restantes componentes como os rolamentos lineares, sistemas de transmissão, tipo de construção do chassi e eletrónica de controlo são semelhantes aos restantes tipos de impressoras.

De seguida serão apresentadas algumas das soluções construtivas comuns para estas impressoras tais como peças, materiais e componentes comuns.

a) Componentes móveis

A parte móvel de uma impressora delta é composta, essencialmente, por três tipos de componentes elementares: o efector, os braços e os carris. Estes componentes podem ser fabricados em materiais metálicos ou poliméricos por maquinagem ou impressão 3D, por exemplo. Devem ser componentes leves e rígidos de modo possuírem uma inércia reduzida para tirar partido das características de funcionamento destas impressoras.

Os braços podem ser construídos a partir de tubos ou vigas feitas de alumínio ou fibra de carbono ou treliças poliméricas. As rótulas, montadas nas extremidades dos braços, podem consistir em juntas universais capazes de oferecer dois graus de liberdade de rotação. Outra opção é a utilização de rótulas esféricas mecânicas ou magnéticas. Estes componentes comportam-se de forma distinta e têm uma grande influência no funcionamento da parte móvel. As rótulas mecânicas, por exemplo, são capazes de transmitir forças elevadas, no entanto são mais suscetíveis a folgas após utilizações prolongadas.

De seguida são apresentados dois exemplos distintos de construção destes componentes em duas impressoras 3D delta que ilustram estas diferenças construtivas. A primeira possui um efector e braços poliméricos e vem equipada com juntas universais para as ligações dos braços

(fig. 24 a). A segunda possui um efector em alumínio maquinado, braços feitos em material compósito de fibra de carbono e rótulas esféricas magnéticas (fig. 24 b).

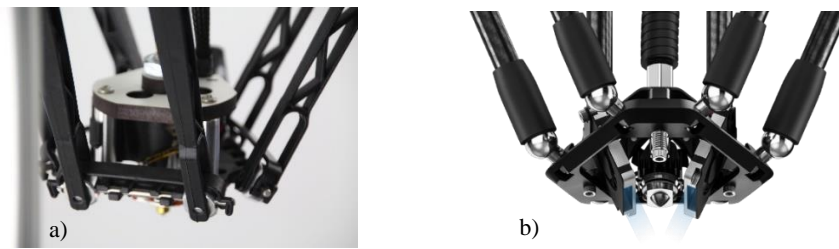


Figura 24 - Diferenças construtivas do efector, rótulas e braços [50, 51]

Para o deslocamento dos carris ao longo das torres, estas máquinas vêm equipadas com diferentes tipos de rolamentos lineares. Os tipos de rolamentos lineares mais comuns para estas impressoras são os rolamentos de esferas cilíndricas (fig. 25 a) ou de carruagem (fig. 25 b) ou carris com rodas com três ou quatro rodas (fig. 25 c).

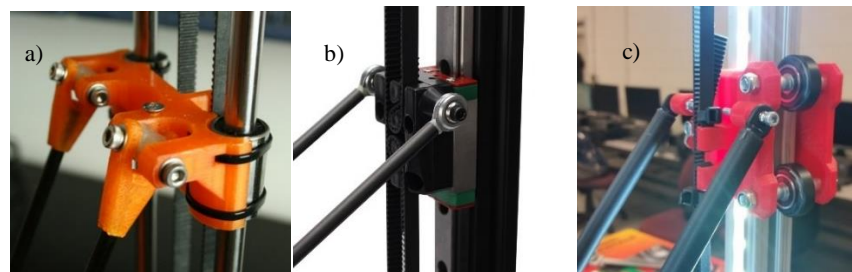


Figura 25 - Tipos de rolamentos lineares dos carris; a) rolamentos de esferas cilíndricas [52] , (b) rolamento de esferas de carruagem [53] e (c) carril com rodas [54].

Para este tipo de impressoras, o tipo de transmissão mais comum consiste num conjunto de polias e correias acionadas por motores de passo. Outros sistemas de transmissão, comuns para impressoras cartesianas, consistem no uso de fusos para converter o movimento angular dos motores em movimento linear dos carris. Esta solução não é adotada em impressoras delta, provavelmente, pelo seu fator de redução elevado, que acabaria por limitar as velocidades contrapondo um dos benefícios deste tipo de impressoras.

b) Chassis

A forma mais comum dos chassis para impressoras delta assemelha-se a um prisma triangular. Esta configuração é a uma solução simples e confere uma elevada rigidez estrutural. A utilização de perfis extrudidos de alumínio para compor as vigas das torres e as vigas laterais é uma opção comum em impressoras existentes no mercado (fig. 26 a). Estas vigas são ligadas através de peças maquinadas ou impressas. Outras opções menos vulgares incluem chassis em madeira, acrílico ou composto por placas de melamina (fig. 26 b).

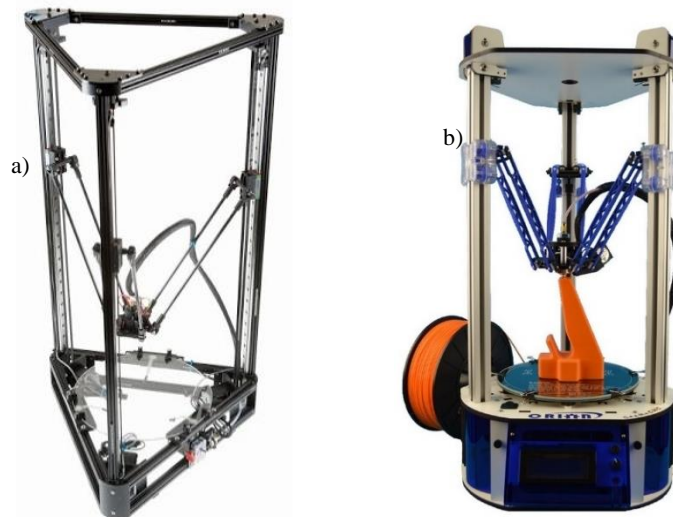


Figura 26 - Tipos de chassis de impressoras delta; (a) chassis composto por perfis de alumínio extrudidos [55] e (b) chassis com painéis de melanina [50].

c) Unidade de extrusão

A unidade de extrusão consiste no conjunto do extrusor e do alimentador, responsáveis por extrudir o termoplástico. Em impressoras delta, o extrusor é montado do efector. Devido à elevada massa do alimentador que é acionado por um motor de passo, a montagem da unidade de extrusão é feita com uma configuração *Bowden* (fig. 27). Consiste na montagem de um tubo que liga o extrusor ao alimentador por onde o filamento é alimentado. Desta forma é possível que a montagem do efector possua uma inércia pequena, permitindo a operação da impressora a velocidades superiores [56, 57].

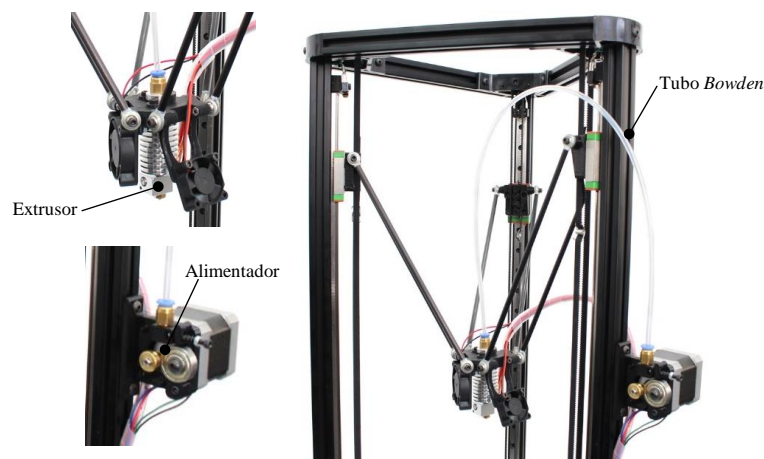


Figura 27 - Configuração *Bowden* da unidade de extrusão, muito comum em impressoras delta [53].

d) Controlo e electrónica

O controlo destas impressoras é feito por CNC. Este tipo de programação é bastante versátil para o controlo de qualquer máquina-ferramenta como é o caso das impressoras 3D por FDM. Através do envio de comandos em código g é possível alterar os parâmetros de funcionamento, desde a velocidade de movimentação até à temperatura do extrusor. Embora o seu modo de funcionamento seja diferente, os comandos CNC para estas impressoras são semelhantes aos outros tipos de impressoras. Algumas impressoras delta podem apresentar

comandos especializados para adicionar funcionalidades específicas para, por exemplo, calibrar o sistema de movimentação.

O *software* da máquina, também chamado de *firmware*, é o programa que será corrido no sistema de controlo da máquina. Este, para além de interpretar as instruções em código g, deve ser capaz de gerir e controlar uma grande variedade de periféricos que vão desde motores, resistências de aquecimento, ventoinhas e sensores de temperatura. Alguns *firmwares* conhecidos, como o *Marlin* ou o *Repetier-Firmware* foram adaptados para o funcionamento com este tipo de máquinas [58].

O componente eletrónico responsável por fazer todas estas operações consiste num microcontrolador. Estes circuitos integrados possuem entradas e saídas digitais ou analógicas que são as interfaces de comunicação com os periféricos. Para impressoras delta, os microcontroladores são responsáveis por fazer o cálculo de conversão da posição dos carris em função da posição desejada do efetor. Estes cálculos são feitos por métodos numéricos, sendo que a velocidade e resolução do cálculo dos microcontroladores afeta diretamente as características de funcionamento. Não existe nenhum microcontrolador adaptado especificamente para este tipo de impressoras, sendo que o *firmware* programado é que terá de ser compatível com o tipo de impressora a operar. O tipo de microcontroladores mais comuns em impressoras 3D são baseados em *Arduino*. Este tipo de microcontroladores será abordado com mais detalhe numa fase posterior. A placa de controlo RUMBa (fig. 28 a) [59] é um exemplo de uma placa de controlo baseada em Arduino. Existe, hoje em dia, uma grande variedade de placas de controlo que diferem na sua arquitetura do microcontrolador, características de funcionamento e tipo de periféricos compatíveis. A placa de controlo *Smoothieboard* é um exemplo de uma placa de controlo baseado num microprocessador de arquitetura tipo ARM (fig. 28 b) [60].

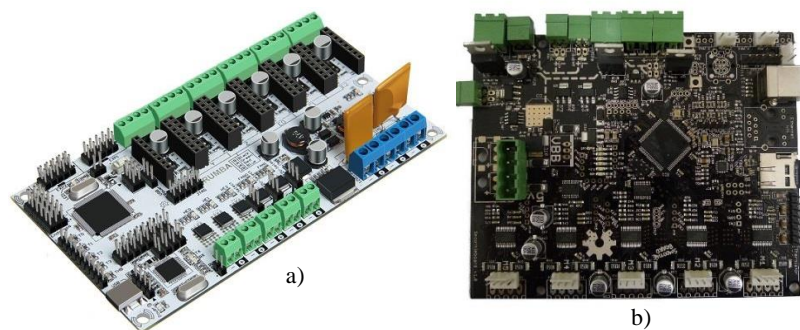


Figura 28 - Placas de controlo para impressoras 3D; a) RUMBa [59] e b) Smoothieboard [60].

Para além do controlo de impressoras 3D, estas placas de controlo podem ser usadas em máquinas semelhantes como fresadoras, máquinas de corte laser ou outras máquinas de controlo por CNC. Algumas impressoras possuem sistemas auxiliares de controlo compostos por microprocessadores que permitem a adição de interfaces gráficas, controlo e monitorização através de uma ligação à internet. Um exemplo destes sistemas são os microprocessadores Raspberry Pi ou equivalentes equipados com um programa específico para esse efeito como o Octopi [61].

e) Exemplos de mercado

No contexto das impressoras 3D delta, fez-se um levantamento de alguns exemplos existentes no mercado, mostrando algumas das suas particularidades construtivas.

DeltaWASP

Esta companhia italiana *WASP* desenvolve e comercializa impressoras 3D sobretudo com a configuração delta. Tem disponível uma gama bastante variada no que diz respeito aos volumes de impressão, desde o modelo *DeltaWASP 2040* (fig. 29 a) até ao *DeltaWASP 3MT* (fig. 29 b) com $\varnothing 200 \times 400$ mm e $\varnothing 1000 \times 1000$ mm, respetivamente. O objetivo principal da companhia é o de angariar fundos para financiar a investigação para a impressão de habitações com materiais sustentáveis [62].

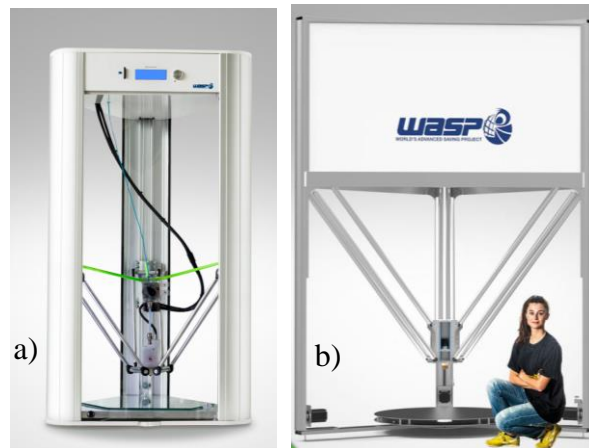


Figura 29 - Modelos 2040 e 3MT da WASP [63].

A impressora *DeltaWASP 2040* tem algumas características únicas, tal como o seu alimentador de filamento flutuante, em que este é suspenso por três elásticos ligados aos carris. Esta configuração permite que a unidade de alimentação do filamento fique mais próxima do extrusor, sem que a sua massa fique acoplada ao efetor.

Foi classificada em 2016 como uma das melhores impressoras destinadas a utilizadores intermediários. Esta impressora custa cerca de 2.400€.

A companhia disponibiliza um kit de extrusão de argila que pode substituir os extrusores de termoplástico. Conhecido por LDM WASP (fig. 30), esta unidade permite a impressão de outros materiais como o barro, porcelana, alumina, zircónia e outros cerâmicos. A consistência do material deve ser adequada para o bom funcionamento do sistema de extrusão. A unidade é constituída por um bico extrusor especial ligado a um depósito pressurizado.



Figura 30 - Sistema LDM desenvolvido pela companhia WASP para impressão de cerâmicos [64].

SpiderBot

A empresa comercializa um produto base (fig. 31 a) e disponibiliza a adição de extras tais como um extrusor duplo (fig. 31 b), um aquecedor da câmara de impressão (fig. 31 c) ou ainda uma câmara para monitorizar remotamente o processo de impressão [65].

O extrusor de dois bicos permite a impressão de dois materiais. Esta capacidade permite, por exemplo, a impressão de peças com diferentes cores ou diferentes materiais. Este sistema consiste num mecanismo oscilante que recolhe uma delas quando não está em uso (fig.30 b). Esta técnica minimiza defeitos relacionados com a deposição de material de forma indesejada por parte da cabeça secundária. O sistema de recolha é feito pelo acionamento de um servomotor na zona lateral do extrusor, que inclina ligeiramente os bicos de extrusão, certificando-se que apenas um deles se encontra no plano de impressão.

O aquecedor permite o aumento da câmara de impressão até os 60°C, o que o torna bastante útil para impressões de grande volume em ABS, por minimizar os efeitos das deformações de origem térmica. O aquecimento é feito através da circulação de ar quente na câmara de impressão.

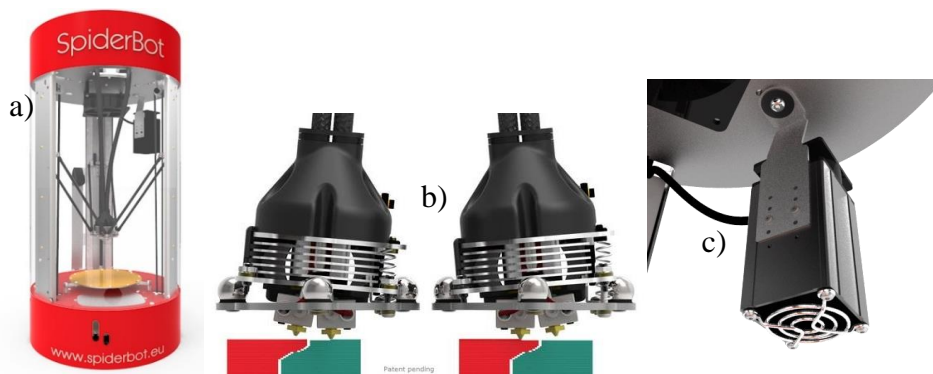


Figura 31 - Impressora SpiderBot (a) mostrando o extrusor duplo oscilante (b) e o aquecedor (c) [65].

Pollen PAM

Esta impressora apresenta um conceito diferente tanto a nível do seu design como de funcionamento. Esta companhia está a explorar o mercado de “luxo” no que diz respeito à impressão 3D.

O modo de funcionamento desta impressora é bastante diferente das analisadas anteriormente, pois tendo uma base móvel, o módulo de alimentação e de extrusão de material está fixo, enquanto que a peça a imprimir acompanha o movimento da base (fig. 32 a).

Tendo uma unidade de extrusão fixa é possível que esta seja mais complexa e robusta. A sua massa não tem grande importância porque não assume um papel ativo na dinâmica da máquina.

Conta com quatro injetores independentes (fig. 32 c), alimentados por *pellets* de material termoplástico (fig. 32 b). Estes sistemas são semelhantes aos injetores de alta pressão de termoplástico que utilizam uma fonte quente e um fuso para fluidificar e comprimir os grânulos de material. Estes injetores convergem num bico o que permite a extrusão multimaterial.



Figura 32 - Impressora Pollen PAM (a), detalhe dos cartuchos de *pellets* (b) e sistema de injeção de multimaterial (c) [66].

2.4 Desenvolvimento de impressoras 3D de baixo custo

Nos últimos anos a impressão 3D tem vindo a receber grande atenção. Apesar das tecnologias utilizadas terem sido desenvolvidas há décadas, só nos últimos anos é que foi possível que estas chegassem ao público em geral.

Em conjugação com a expiração dos direitos de propriedade intelectual de algumas tecnologias de MA, em especial a tecnologia FDM, formaram-se várias comunidades de entusiastas em todo o mundo que se dedicaram ao desenvolvimento de impressoras 3D. Com o auxílio da internet, estas comunidades serviram como uma incubadora para a troca de conhecimentos e experiências em impressão 3D.

2.4.1 O movimento *Open-Source*

Open-Source consiste num modelo de desenvolvimento que promove a distribuição do design de produtos através de um licenciamento livre dando a oportunidade a qualquer interessado de o consultar e modificar.

Esta filosofia de trabalho faz com que haja uma grande variedade de *softwares* que derivam de um ancestral comum. Esses novos programas poderão ter novas funcionalidades que satisfazem os interesses e necessidades de cada programador. Em contraste com *softwares* proprietários em que os fabricantes dão grande importância à proteção do seu código por considerarem uma vantagem competitiva, num contexto *open-source* há um encorajamento da modificação do mesmo. Um exemplo desta evolução é o sistema operativo Android que é uma derivação do sistema operativo Linux, mas adaptado e otimizado para plataformas móveis.

Entre os tipos de licenças usadas por comunidades *open-source* encontram-se as licenças GPL e *Creative Commons*. Estas licenças lidam sobretudo com aspetos éticos da utilização de recursos *open-source*, como a atribuição da autoria de um determinado produto ou *software* ou possíveis restrições de comercialização.

A implementação do conceito *open-source* noutras áreas e produtos proporcionou o aparecimento do chamado *open-source hardware* que aplica o modelo de desenvolvimento a produtos físicos. Neste caso, o desenho de uma máquina, peça ou componente eletrónico é tornado público e a sua construção, alteração e modificação pode ser feita livremente. Estes são identificados por um logotipo que ajuda a identificar produtos desenvolvidos neste modelo (fig.33).



Figura 33 - Logotipo identificativo em *hardware open-source* [67].

No fundo, a filosofia *open-source* é um modo de trabalho que valoriza a livre partilha de conhecimento que ajuda, de uma forma comunitária, a satisfazer as necessidades de um grupo específico de pessoas. Numa sociedade moderna, muitas dessas necessidades têm de alguma forma um cariz tecnológico.

Um questionário feito aos membros pela OSHWA (*Open Source Hardware Association*) concluiu que a maior parte dos utilizadores de *hardware open-source* fazem-no com o objetivo de estudar o desenho de componentes existentes e compreender o seu funcionamento. Em relação à demografia desta comunidade, o mesmo estudo concluiu que maior parte dos utilizadores estão associados a áreas da engenharia, ciência e educação [68].

As tecnologias de MA foram, durante muito tempo, muito restritivas no que diz respeito aos seus potenciais utilizadores. Não é de admirar que a filosofia *open-source* viesse a ser implementada nesta área. Existem dois projetos criados neste âmbito que vale a pena destacar: *Fab@Home* e *RepRap*. Os objetivos iniciais destes projetos diferem, mas contribuíram igualmente para dar o ponto de partida no rápido desenvolvimento e difusão das impressoras 3D para fabrico pessoal e de baixo custo que tem vindo a acontecer nos últimos anos.

Os microcontroladores *Arduino* viabilizaram o desenvolvimento dos sistemas de controlo eletrónico para impressoras 3D de baixo custo devido à sua grande disponibilidade, custo reduzido e suporte.

2.4.2 O projeto *Fab@home*

Iniciado em 2005, o conceito original do projeto foi desenvolver e distribuir uma plataforma de manufatura pessoal de baixo custo direcionado a entusiastas, inventores e artistas [69].

O primeiro modelo, designado por *Model 1* (fig.34), tinha um chassis em placas de acrílico e o módulo de extrusão era composto por duas seringas. Este sistema só permitia extrusão de materiais no estado pastoso tal como alguns produtos alimentares, pastas de cerâmica ou resinas.

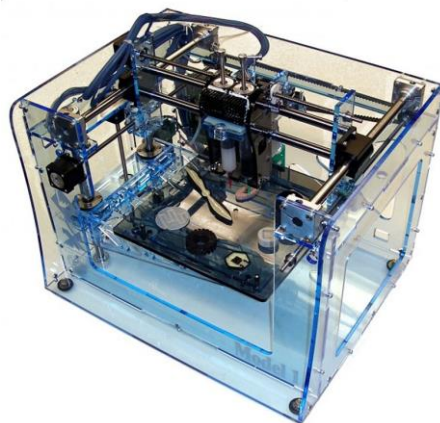


Figura 34 – Impressora *Fab@Home Model 1* [69].

Apesar do conceito inovador, este projeto foi gradualmente perdendo atenção devido a vários defeitos a nível tecnológico, económico e comunitário. O facto de não ser possível imprimir peças com materiais duráveis e resistentes e o seu custo relativamente elevado não conseguiu cativar muitos dos seus potenciais utilizadores. Esta falta de interesse criou uma comunidade reduzida em torno do projeto. A falta de suporte por parte dos responsáveis do projeto e falta de feedback dos utilizadores colocou o projeto em declínio, terminando oficialmente em 2012.

O seu design serviu de inspiração para os vários modelos da *MakerBot* que é, atualmente, uma das empresas com maior sucesso no mercado de impressoras pessoais.

Variantes destas impressoras foram usadas em programas escolares chamados de *Fab@School*. O objetivo é sensibilizar os jovens sobre as tecnologias e potencialidades da impressão 3D. Modelos baseados no conceito original também foram utilizados na investigação de impressão de tecidos biológicos [10].

2.4.3 O projeto RepRap

O objetivo do projeto *RepRap* foi criar uma impressora 3D com a capacidade de fabricar uma grande parte das suas próprias peças usando o processo FDM. Os restantes componentes necessários para a estrutura seriam materiais de construção facilmente adquiridos em qualquer loja de *bricolage*.

O seu nome está associado com o termo *Replicating Rapid Prototyper*. O fundador deste projeto foi Adrien Bowyer, professor na área da engenharia mecânica da universidade de Bath, no Reino Unido. A reprodutibilidade da máquina em conjugação com a filosofia *open-source* deste projeto criou uma grande comunidade que contribuiu para a sua diversidade e rápida evolução [70]. Muitos dos modelos desenvolvidos são de cariz experimental com o objetivo de caracterizar o seu desempenho e viabilidade. As suas características de reprodução e o processo de evolução das máquinas pela comunidade levou vários analistas a constatar o seu interesse no âmbito da biomimética¹ [70].

O primeiro modelo desenvolvido, denominado por Darwin I (fig. 35), foi construído com peças produzidas por FDM e a sua estrutura feita a partir de vigas e veios roscados. Foi estimado que cerca de 48% das suas peças podiam ser produzidas pela própria máquina.

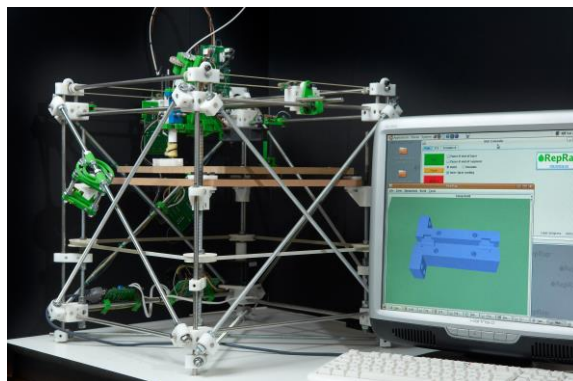


Figura 35 - Darwin I, a primeira impressora 3D desenvolvida no âmbito do projeto RepRap [71].

¹ Área da ciência que tem por objetivo o estudo das estruturas biológicas e das suas funções, procurando aprender com a Natureza, suas estratégias e soluções, e utilizar esse conhecimento em diferentes domínios da ciência.

A comunidade *RepRap* tem atraído um grande número de entusiastas e conta com um elevado número de utilizadores de impressoras baseadas no projeto. Num inquérito feito em 2012 a utilizadores de impressoras 3D, a maior parte tinha utilizado impressoras derivadas no projeto (fig. 36) [72].

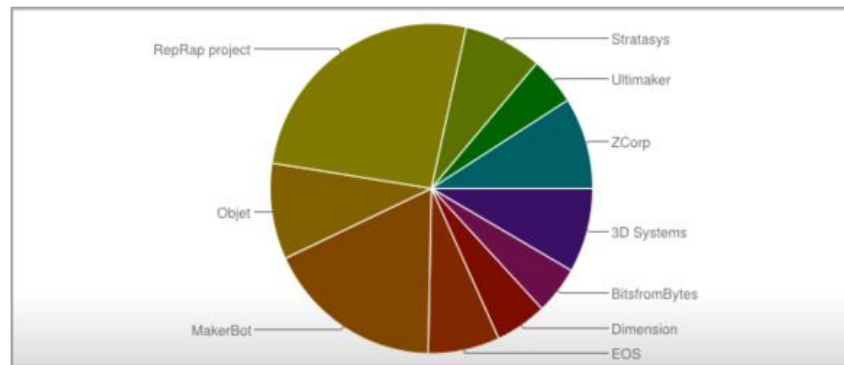


Figura 36 - Proporção de utilizadores de impressoras 3D de diferentes companhias [72].

Em 2010 a primeira impressora delta foi desenvolvida no seio do projeto [73]. Designada por *Helium Frog Delta Robot* (fig. 37 a), tinha uma estrutura muito semelhante ao modelo Darwin que combina veios roscados com ligações por pequenas peças impressas. Inspirada nesta máquina, em 2012 foi desenvolvido o modelo *Rostock* (fig. 37 b) por Johann Rochol. Para além das diferenças construtivas entre estas máquinas, a sua geometria foi refinada dando uma maior atenção à cinemática. A partir desta, foi desenvolvida a *Kossel* (fig. 37 c), que apresenta algumas melhorias no que diz respeito à sua estrutura e rolamentos lineares, entre outros componentes. A resolução de impressão também foi ligeiramente melhorada. Uma das limitações de projeto, para estes dois últimos modelos foi o custo das máquinas, que não deveriam ultrapassar os 500 dólares, para a *Rostock*, nem os 600 dólares para a *Kossel*. Ambas foram desenvolvidas com a simplicidade construtiva em mente pelo que um dos objetivos foi estabelecer um limite de 200 peças [74, 75].

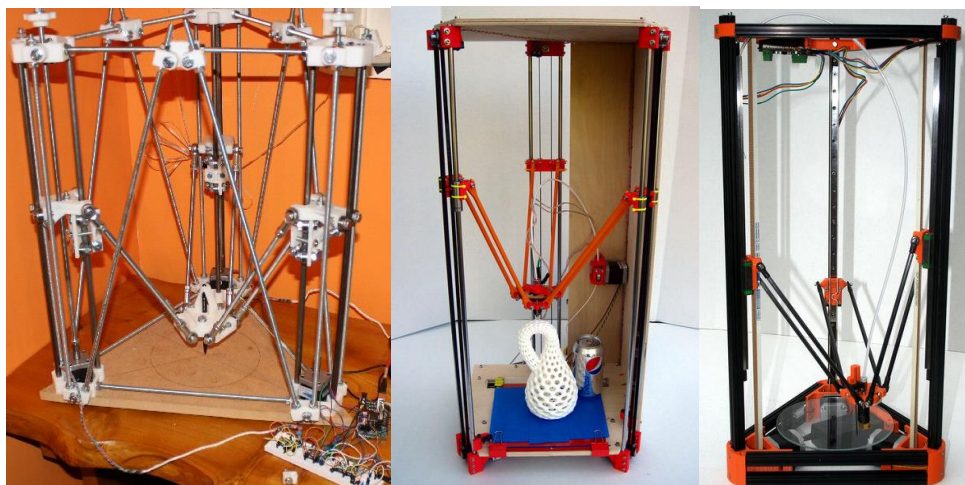


Figura 37 - Impressoras delta desenvolvidas no âmbito do projeto RepRap; a) *Helium Frog Delta Robot* [73], (b) *Rostock* [74] e (c) *Kossel* [75].

Hoje em dia existem vários modelos comerciais baseados nestes projetos, sendo que alguns fabricantes se referem às suas impressoras remetendo para as designações destes modelos [53, 55].

O conhecimento disponibilizado no seio deste projeto é de grande valor para quem pretende construir impressoras 3D, que vão desde dicas de dimensionamento, comparação entre soluções construtivas e outros recursos, tanto a nível de *software* como de *hardware*.

2.4.4 O Arduino

O *Arduino* refere-se a uma placa de prototipagem eletrónica baseada em microcontroladores AVR da companhia *Atmel*. Os *Arduinos* têm despertado o interesse dos mais variados utilizadores, tendo aplicações em ambientes académicos ou domésticos [76]. O *Arduino* permitiu que a programação de microcontroladores estivesse acessível ao grande público com conhecimento limitados em eletrónica e programação, tornando a sua utilização simples e com preços bastante atrativos [77]. Como já foi descrito anteriormente, a sua conceção num ambiente *open-source* dá lugar a um grande suporte por parte das comunidades, onde são partilhados projetos e instruções de utilização.

Existe uma grande variedade de placas que diferem em relação ao seu poder de processamento, memória e número de pinos, entre outros. Grande parte das placas são baseadas em microcontroladores de *8bits*, embora esteja atualmente a emergir o interesse em microcontroladores mais potentes de *32bits*. As placas possuem uma série de pinos que permitem a ligação dos mais variados componentes eletrónicos desde motores, LEDs, botões, potenciómetros, etc. O espaçamento padrão destes pinos possibilitou o desenvolvimento de placas auxiliares, conhecidas como *shields*, que adicionam diferentes funcionalidades especializadas ao circuito eletrónico, desde comunicação em rede a interfaces gráficas.

A programação destas placas é feita a partir de um *software*, chamado *Arduino IDE* (*Integrated Development Environment*) que é disponibilizado gratuitamente pela companhia.

Consequência da sua elevada flexibilidade, muitos processos de controlo eletrónico foram adaptados e implementados nestas placas. Deste modo, os *Arduinos* tornaram-se numa boa opção para o controlo de impressoras 3D de baixo custo. O modelo *Arduino Mega 2560* tem sido o modelo de eleição para esta aplicação por possuir um número elevado de pinos e um suficiente poder de processamento. No âmbito do projeto RepRap foram desenvolvidas várias placas de expansão como a RAMPS (*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*) (fig. 38) e placas baseadas no *Arduino Mega*, como a RAMBo (*RepRap Arduino Compatible Board*) ou a RUMBA (*RepRap Universal Mega Board with Allegro driver*).

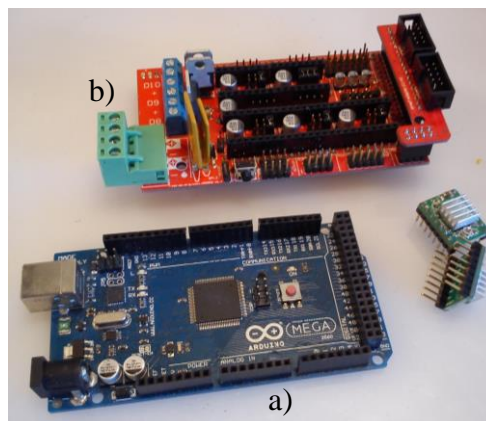


Figura 38 – Placa de controlo para impressoras 3D composta por um Arduino Mega 2560 (a) e um *Shield* RAMPS 1.4 (b).

2.4.5 Peças para impressoras 3D

O aumento da procura de impressoras de baixo custo mobilizou fabricantes e fornecedores a explorar esta área do mercado. O carácter *open-source* de uma grande parte dos componentes para estas impressoras significou que qualquer fabricante podia replicar peças com poucas ou nenhuma restrições de comercialização.

A compra de peças pela internet é uma opção que permite obter peças que não existem ou com oferta muito limitada no mercado local. Lojas *online* generalistas como o *Ebay* e o *Aliexpress* possuem um catálogo variado de máquinas e componentes a preços atrativos. Grande parte dos fornecedores nestas lojas estão sediados na China, que é um país de referência no que diz respeito à sua capacidade industrial. O aumento do interesse na impressão 3D verificado nos últimos anos tem feito com que as economias de escala sejam aplicadas a esta área que, por consequência, estão a aumentar a sua variedade e a reduzir consideravelmente os seus custos.

Após a compreensão do método de impressão 3D por FDM, do funcionamento das impressoras do tipo delta e após ter sido feito um levantamento de alguns projetos e recursos existentes úteis para o desenvolvimento de impressoras 3D, serão estabelecidas algumas características alvo para o desenvolvimento de uma impressora do tipo delta.

3 Proposta de trabalho

Pretende-se desenvolver e construir uma impressora FDM do tipo delta tendo em conta um conjunto de requisitos. Esta impressora servirá para fazer estudos sobre o seu funcionamento e processo de impressão. Para isso será seguida uma metodologia organizada através de um conjunto de etapas de trabalho de modo a tornar o processo de desenvolvimento mais eficiente. A principal vantagem de desenvolver e construir uma impressora 3D em vez de adquirir uma no mercado é o de lhe conferir as características e funcionalidades desejadas, nomeadamente ser um produto de ensino e investigação. Este processo de desenvolvimento serve também para compreender melhor o funcionamento e a construção deste tipo de máquinas, assim como facilitar a identificação da origem de possíveis problemas de funcionamento.

3.1 Definição do problema

Com este projeto pretende-se desenvolver e fabricar uma impressora FDM do tipo delta. Este equipamento será usado no LDPS para permitir a impressão de peças com alturas superiores às impressoras FDM já existentes neste laboratório. Entre estas estão duas impressoras *CubePro* da *3D Systems*, que possuem uma altura máxima de impressão de 230mm [78] e uma impressora de baixo custo, desenvolvida por um estudante da FEUP, com uma altura de impressão por volta dos 300mm.

Pretende-se também que a impressora a desenvolver possua um extrusor multimaterial. No futuro, esta máquina será usada como ferramenta de investigação onde serão analisados, com maior detalhe, o funcionamento e eficácia do sistema de movimentação delta e aspetos referentes ao processo FDM multimaterial, que é uma inovação que tem vindo a receber grande interesse ultimamente. Pretende-se imprimir sobretudo PLA por ser um material de elevada disponibilidade e utilização em impressoras FDM. A impressão de ABS será vista como uma mais-valia, embora a máquina não seja desenvolvida no sentido de otimizar impressões neste material.

Um dos fatores determinantes no desenvolvimento deste protótipo será o custo do mesmo. De modo a minimizar as despesas totais deverá ser equacionada a possibilidade de fabricar ou adquirir componentes no mercado destinados a uma determinada função. Neste mesmo sentido, a reutilização de peças ou componentes disponibilizados pelo INEGI/FEUP será uma alternativa vantajosa. O projeto *RepRap* será uma boa fonte de recursos úteis para o desenvolvimento da impressora, tanto a nível de *hardware* como de *software*.

Concluindo, alguns dos requisitos necessários para a máquina são:

- Adoção de um sistema de movimentação delta linear;
- Impressão de peças altas;
- Adoção de um extrusor multimaterial;
- Impressão de PLA e ABS;
- Baixo custo;
- Utilização de recursos disponibilizados pelo projeto *RepRap*;
- Reutilização, se possível, de peças ou componentes disponibilizados pelo INEGI/FEUP;

De seguida, será apresentada a metodologia adotada, identificando as diferentes etapas e objetivos específicos a atingir no decorrer deste projeto.

3.2 Metodologia

A fase de desenvolvimento de um produto é aquela que requer uma maior atenção e planeamento de modo a tornar as fases posteriores mais expeditas. Em primeiro lugar é necessário obter o máximo de informação sobre o tema do projeto. Este processo passa pela análise das tecnologias envolvidas e de produtos semelhantes que vão ajudar no estabelecimento de um conjunto de objetivos e funcionalidades para o projeto em questão. Nas fases seguintes é necessário ter sempre em mente os objetivos e limitações do projeto já que serão estes parâmetros que vão viabilizar ou não uma determinada solução construtiva. É importante referir que para qualquer projeto de desenvolvimento de produto as diferentes fases devem ser encaradas de uma forma integrada. Isto significa que cada etapa de trabalho deve ser feita no sentido da minimização da utilização de recursos nas fases seguintes. Estes recursos podem apresentar-se na forma de tempo de desenvolvimento, custos, materiais e recursos humanos, por exemplo. A relação entre as diferentes etapas significa também que nem sempre o projeto assume um rumo linear havendo por vezes a necessidade de alterar ou complementar aspetos de etapas anteriores ou posteriores. As primeiras soluções escolhidas nem sempre são as mais adequadas, havendo também a necessidade de fazer várias iterações em busca dos resultados pretendidos.

Do ponto de vista de engenharia há uma maior preocupação na área tecnológica que vai desde o desenvolvimento de protótipos, o seu fabrico e validação dos mesmos através de testes.

Posto isto, definiu-se um conjunto de etapas e objetivos a seguir neste projeto, sintetizados no seguinte esquema:

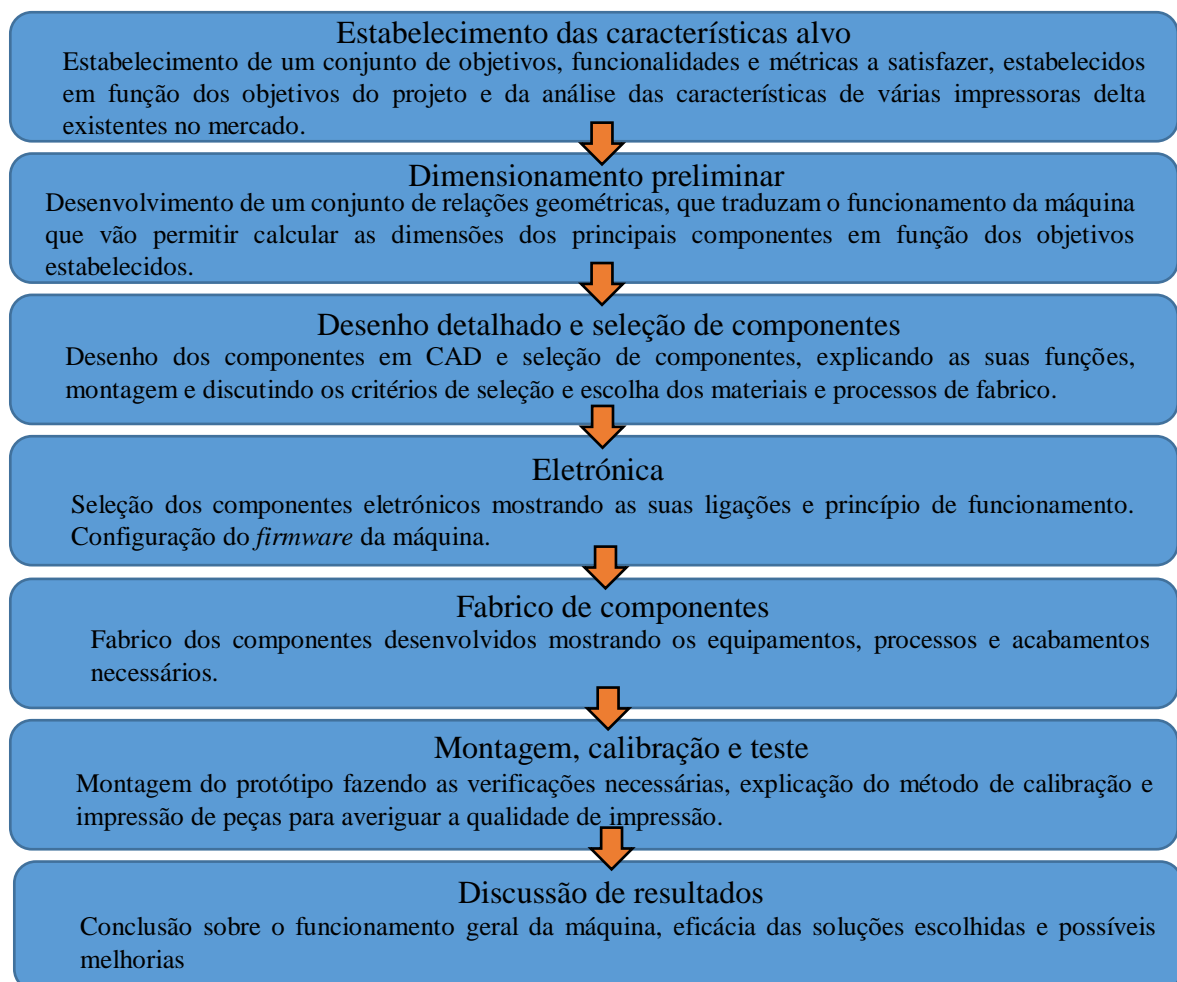


Figura 39 – Etapas e objetivos definidos para a realização do projeto.

3.3 Benchmark de impressoras delta

O *benchmark* de impressoras delta serviu para analisar as características de várias impressoras delta disponíveis no mercado. Compilou-se uma tabela com as características para 12 impressoras, disponíveis no anexo B.

Em relação à zona de impressão foi possível concluir que as alturas de impressão vão desde os 125 aos 600mm, sendo que para a maior parte das impressoras analisadas, a altura de impressão ronda os 400mm. Já o diâmetro de impressão varia entre os 125 e os 300mm.

De forma geral as velocidades de impressão e movimentação rondam os 100mm/s e os 200mm/s. A resolução de camada mais baixa é de 40µm, no entanto é mais comum estas estarem compreendidas entre os 50µm e os 100µm. As maiores resoluções de posicionamento nos eixos X e Y rondam os 10µm.

Grande parte das impressoras são compatíveis apenas com filamentos com 1,75mm de diâmetro. O diâmetro do bico extrusor mais adotado é de 0,4mm. Em média, os extrusores são capazes de atingir temperaturas até os 260°C, sendo o PLA o material mais indicado para a maioria das impressoras. O ABS, PVA e PETG, um co-polímero do PET, são materiais indicados apenas para algumas impressoras. Menos de metade dos modelos em análise possuem superfícies de impressão aquecidas. Nesses casos, as temperaturas para estes componentes rondam os 100°C. A maior parte das impressoras analisadas possuem um extrusor simples. Apenas três delas são capazes de imprimir vários materiais simultaneamente, duas delas permitindo a mistura dos mesmos.

Para o controlo, a maioria usa microcontroladores *open-source* e a forma de comunicação mais comum é a ligação USB, havendo uma pequena porção que possui ligações Wi-Fi e Ethernet. Alguns dos modelos permitem a impressão através de cartão SD.

Para a maior parte das máquinas, o chassis apresenta uma forma prismática triangular composta por perfis de alumínio. Três delas possuem uma câmara de impressão fechada, o que é um benefício para manter a temperatura de impressão e evitar deformações térmicas das peças. Esta particularidade facilita impressões sobretudo em ABS.

Em relação aos custos das máquinas, a mais barata custa cerca de 190€ e a mais cara custa mais de 8.000€. O custo médio dos equipamentos em análise é de 1.870€. Não parece haver uma relação direta entre o custo dos equipamentos e as suas características. Os custos deverão, por isso, estar mais relacionados com a qualidade de construção.

A análise da construção destas máquinas servirá como inspiração para desenvolvimento da impressora no âmbito deste projeto. Os tipos de componentes, materiais e funcionalidades serão aspetos a ter em conta para a construção de uma máquina robusta, polivalente e fiável.

3.4 Características-alvo

Após a análise das características típicas para impressoras delta estabeleceu-se um conjunto de métricas que serão essenciais para o dimensionamento e seleção de componentes.

Quanto às principais características da máquina poderão ser destacados o seu volume de impressão e a altura mínima de camada entre outros:

- Volume de impressão de, pelo menos, um cilindro com 200mm de diâmetro e 500mm de altura.

- Altura mínima de camada será de, pelo menos, 100µm. Deve ter em conta o a resolução de posicionamento do sistema de movimentação assim como a seleção de um extrusor com um diâmetro compatível.
- Diâmetro para o bico extrusor de 0,4mm. Este valor é o mais comum nas impressoras delta analisadas. Apesar de não ser a medida mais indicada para a impressão de alturas de camada pequenas, é menos suscetível a entupimentos de material quando comparado com bicos de 0,3 ou 0,2mm de diâmetro.
- Filamentos com 1,75mm de diâmetro por ser a medida mais comum no mercado.

O extrusor deverá ser capaz de atingir temperaturas de pelo menos 200°C para permitir a impressão de PLA. Se for possível que este atinja temperaturas superiores, por volta dos 240°C será interessante para a impressão de outros materiais como o ABS ou HIPS. Deseja-se a adição de uma base de impressão aquecida por permitir uma boa aderência da peça à mesma sem a necessidade de fazer qualquer tratamento da superfície. Do mesmo modo, a base aquecida será indispensável para impressão de materiais com elevadas dilatações térmicas, como o ABS.

A conexão de dados por USB permitirá a ligação e controlo a partir de um computador equipado com um *software* para esse efeito. A impressão direta através de um cartão SD, que é também uma opção comum para este tipo de impressoras, tornará possível a impressão de ficheiros em código c, quando a ligação a um computador não esteja disponível. Pela mesma razão, a impressora deverá possuir um painel de controlo para editar e monitorizar os parâmetros de impressão e outras características de funcionamento.

As características acima descritas foram compiladas na tabela 4.

Tabela 4 – Características-alvo estabelecidas para a impressora.

	Característica	Valor
Espaço de trabalho	Volume de impressão	ø200mm*500mm
Resolução	Altura de camada	≤ 0,1mm
Velocidade	Velocidade de impressão	>80mm/s
Características do extrusor	Diâmetro do bico extrusor	0,4mm
	Diâmetro do filamento	1,75mm
	Temperatura do bico extrusor	≥ 200°C
Superfície de impressão	Temperatura da base	≥ 60°C
Comunicação e controlo	Painel de controlo, USB e cartão SD	

3.5 Arquitetura do produto

Fez-se um esboço da arquitetura de produto para a impressora a desenvolver (fig. 40). Este diagrama é uma forma útil e intuitiva para compreender quais as relações entre os diferentes conjuntos e quais as suas funções. Poderá ser consultado sempre que seja necessário fazer alguma alteração nos componentes da máquina ou no caso de implementação de funcionalidades adicionais. Os componentes foram agrupados em conjuntos que formam módulos. Cada módulo pode, por isso, ser desenvolvido com um certo grau de independência, desde que seja clara a sua função específica no funcionamento da impressora, tendo em conta a relação que estes módulos têm com os restantes componentes. Para esta arquitetura da máquina, são apresentados os fluxos de energia, material e informação entre os diferentes componentes. Representou-se também as ligações mecânicas previstas para a impressora e discriminou-se quais os componentes móveis ou fixos.

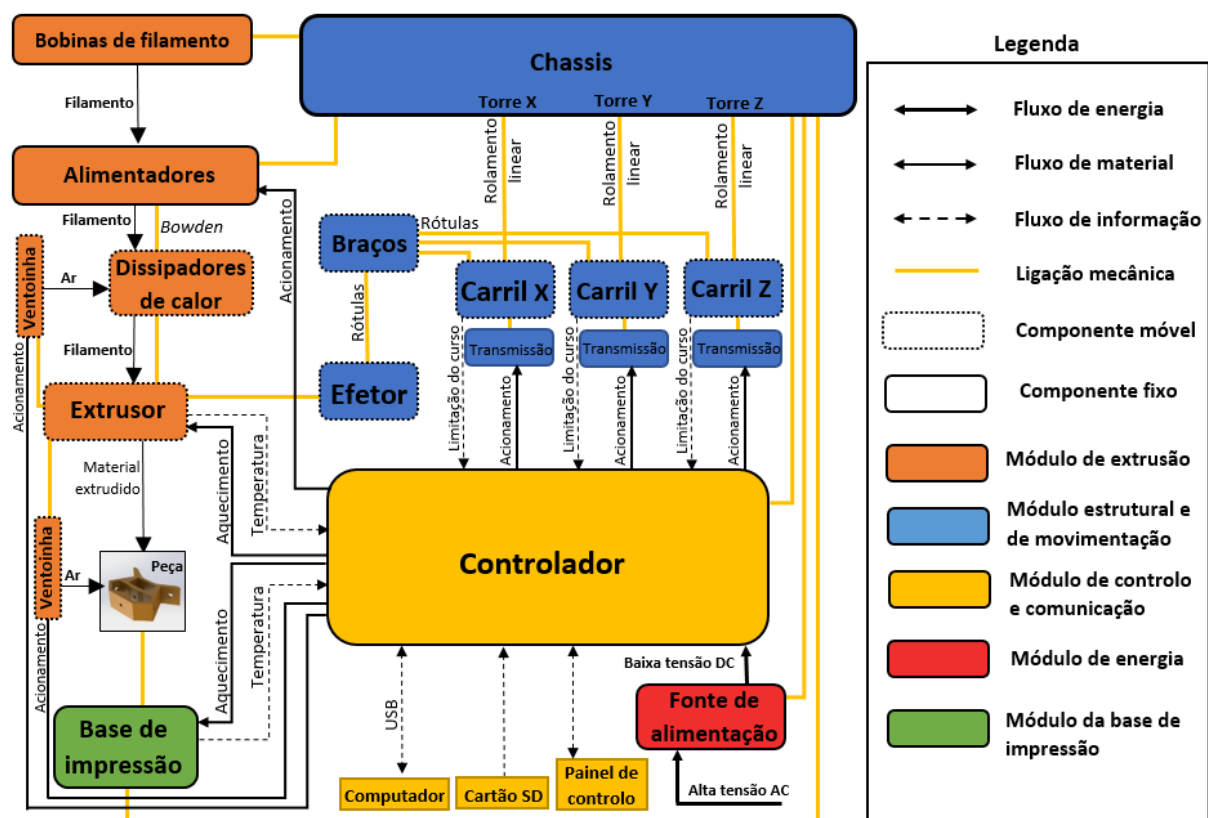


Figura 40 - Arquitetura do produto para a impressora a desenvolver, separada por diferentes módulos.

De seguida organizou-se algumas das funções específicas, funcionalidades e requerimentos para cada módulo.

Módulo de Extrusão

- Alimentar o filamento;
- Guiar o filamento até ao extrusor;
- Arrefecer do filamento à entrada do extrusor;
- Arrefecer o material extrudido/peça;
- Permitir a montagem do extrusor no efetor;
- Extrudir o termoplástico a quente;
- Isolar as peças adjacentes ao extrusor.

Módulo estrutural e de movimentação

- Possuir um sistema de movimentação delta linear (efetor, braços e carris);
- Transmitir movimentos entre componentes referidos acima através de rótulas;
- Ligar os carris aos sistemas de transmissão;
- Permitir o deslizamento dos carris, ao longo das torres do chassis, através de rolamentos lineares;
- Permitir a montagem dos componentes fixos e protegê-los;
- Ser estável e robusto.

Módulo de controlo e comunicação

- Acionar os motores que transmitem o movimento aos carris;
- Acionar os motores responsáveis pela alimentação do filamento;
- Aquecer o extrusor e medir a sua temperatura;
- Aquecer a base de impressão e medir a sua temperatura;
- Detetar e limitar a posição dos carris;
- Acionar as ventoinhas de arrefecimento;
- Possuir um comando de emergência;
- Permitir a conexão a um computador, para fins de controlo e monitorização, por USB;
- Permitir a impressão de peças a partir de um cartão SD;
- Permitir o controlo, monitorização e edição dos parâmetros de funcionamento a partir de um painel de controlo ou de um computador;
- Ser alimentado por baixa tensão DC.

Módulo de energia

- Converter a alta tensão AC em baixa tensão DC, de modo a alimentar o controlador;
- Possuir um sistema de proteção e de corte geral de energia.

Módulo da base de impressão

- Permitir a fixação da peça;
- Permitir o ajuste manual da posição da base de impressão;
- Possuir isolamento térmico.

3.6 Processos de fabrico disponíveis

Conhecer quais os processos de fabrico disponíveis para a produção do protótipo físico são determinantes na fase de desenho, pois influenciam as geometrias e materiais a utilizar no projeto. Felizmente, o LDPS e o INEGI possuem equipamentos de fabrico aditivo, maquinaria e conformação plástica que vão oferecer uma grande flexibilidade nesta fase do projeto.

No LDPS estão disponíveis vários equipamentos de MA. De modo a reduzir o custo final das peças, as impressoras FDM serão as escolhas prioritárias. Através destes processos será possível a produção de peças poliméricas, de uma forma rápida, que vão permitir a ligação entre os vários componentes.

As oficinas do INEGI possuem equipamentos que vão permitir o fabrico de peças por maquinaria e conformação plástica. Grande parte destes equipamentos operam por CNC pelo que vão tornar o fabrico, a partir dos protótipos virtuais das peças, rápido e eficiente. Com estes equipamentos, em específico, será possível o funcionamento de chapas e fresagem de diversos materiais.

Entre outros processos que poderão ser úteis para a construção da impressora pode-se incluir operações de furação e corte, acabamentos como a lixagem e tratamentos superficiais de abrasão e ainda o torneamento de peças. Para a parte eletrónica da máquina poderá também ser necessária a soldagem de componentes eletrónicos.

4 Desenvolvimento

4.1 Dimensionamento preliminar

Antes de começar a fazer um desenho detalhado da impressora, foi necessário estabelecer um conjunto de dimensões (fig. 41). Estas referem-se ao tamanho das diversas vigas que compõem o chassi, assim como os comprimentos gerais dos elementos móveis, tais como os braços, o efetor e os carris, entre outros. Começou-se por estabelecer as variáveis para cada uma das dimensões da impressora. Entre estes estão os diâmetros da máquina e o diâmetro de impressão, o comprimento dos braços e os *offsets* do efetor e dos carris. De seguida modelou-se matematicamente as relações entre as diferentes variáveis com o objetivo de calcular os seus valores em função das características pretendidas. Foram feitos alguns comentários e observações sobre a influência que estas dimensões têm no funcionamento e desempenho da máquina.

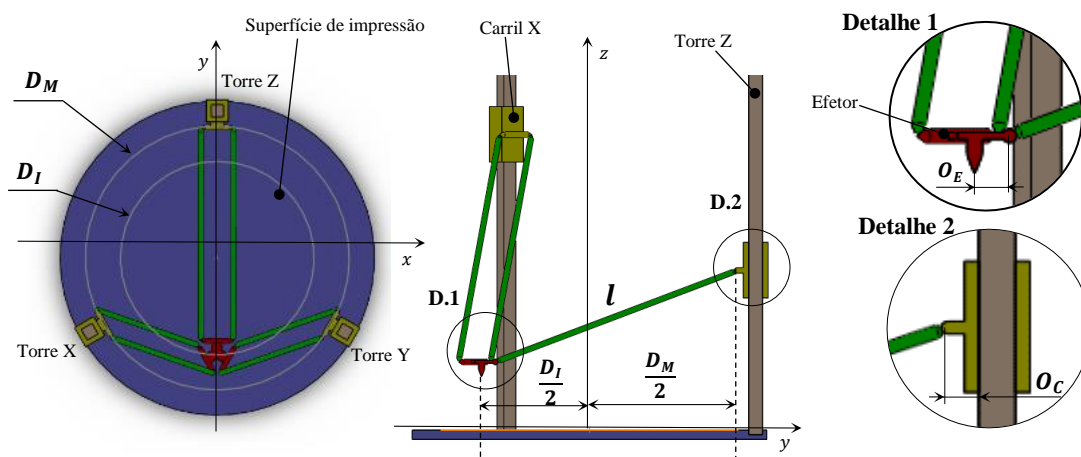


Figura 41 - Principais dimensões da máquina (D_I -diâmetro de impressão; D_M – diâmetro da máquina; l – comprimento dos braços; O_C – *offset* do carril; O_E – *offset* do efetor).

4.1.1 Relações geométricas

4.1.1.1 Ângulos

O dimensionamento com base nos ângulos formados entre vários componentes tem um interesse especial pois permite correlacionar várias medidas num só parâmetro. A limitação de alguns ângulos na cadeia cinemática da máquina permite ainda garantir a estabilidade e o funcionamento correto da máquina.

Dois dos ângulos com mais interesse para o dimensionamento são o ângulo formado entre o efetor e os braços (α) e o ângulo formado entre o carril e os braços (β).

O primeiro, denominado por α , pode ser definido para duas situações distintas: quando o efetor se encontra no centro do círculo de impressão (fig. 42) e quando o efetor se encontra na periferia do círculo de impressão, num ponto mais afastado de uma das três torres. Nesta segunda situação, o ângulo α assume o seu valor mínimo (fig. 43).

O segundo, denominado por β , refere-se a uma situação particular, em que o efetor se encontra na periferia do círculo de impressão num ponto mais próximo de uma determinada torre (fig.44). O conhecimento deste ângulo tem menos importância para o dimensionamento da impressora, mas serve para conferir que o efetor não toca na torre.

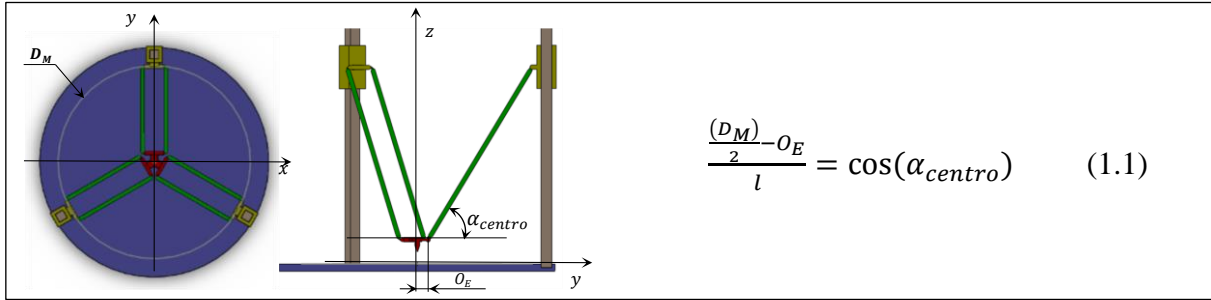


Figura 42 - Ângulo α quando o efector se encontra no centro da área de impressão.

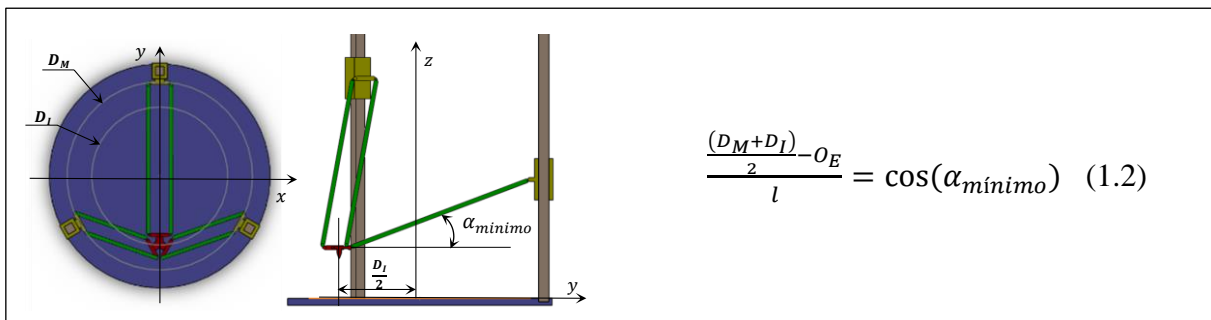


Figura 43 - Ângulo α quando o efector se encontra na periferia da área de impressão.

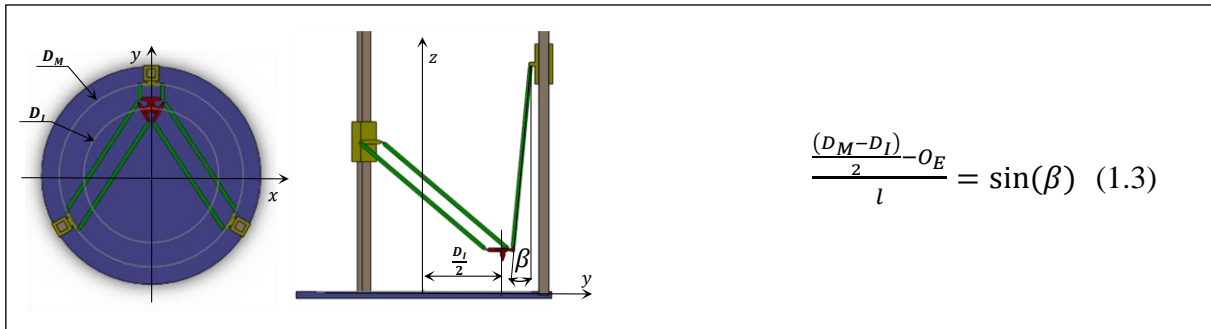


Figura 44 - Ângulo β quando o efector se encontra na periferia da área de impressão.

4.1.1.2 Afastamento entre os braços

O afastamento entre braços (fig. 45) não tem qualquer influência no cálculo do diâmetro de impressão nem na dimensão da própria máquina. No entanto, tem grande importância na estabilidade do efector durante o funcionamento da máquina. Um maior afastamento entre os braços permite a absorção de momentos no efector. Estes momentos podem estar associados a cargas no efector de origem dinâmica ou forças geradas por atritos nas rótulas [79].

Para que o paralelogramo formado pelo efector, carril e braços funcione corretamente, o afastamento entre os braços deve ser igual. Para determinar este afastamento há que fazer uma análise custo-benefício com o *offset* do efector. Através do aumento do *offset* do efector é possível um maior afastamento entre braços conferindo uma maior estabilidade ao efector, no entanto o diâmetro da máquina terá de ser aumentado para um mesmo diâmetro de impressão. Este aspeto

implica um rácio menor entre volume de trabalho e volume da máquina. Esta conclusão pode ser tirada a partir da análise das expressões 1.1 e 1.2.

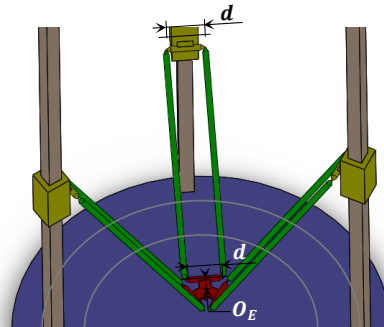


Figura 45 - Afastamento entre braços (d).

4.1.1.3 Altura de impressão

A altura de impressão não influencia diretamente na cinemática do sistema. Para o desenho da máquina é necessário conhecer qual a altura das torres para que seja possível imprimir até à altura desejada. O cálculo pode ser simplificado considerando que qualquer um dos pares de braços se encontra na posição vertical. Esta situação, ilustrada na figura 46, permite contabilizar o curso vertical necessário percorrido pelos carris quando o efector se encontra na altura máxima de impressão.

O volume de impressão para impressoras delta pode ser aproximado a uma forma cilíndrica onde, neste caso, a dimensão h representa a altura do mesmo.

Posto isto, é necessário que as torres sejam mais compridas (H) do que a soma da altura de impressão desejada (h) mais o comprimento dos braços (l)

$$H \geq h + l \quad (1.4)$$

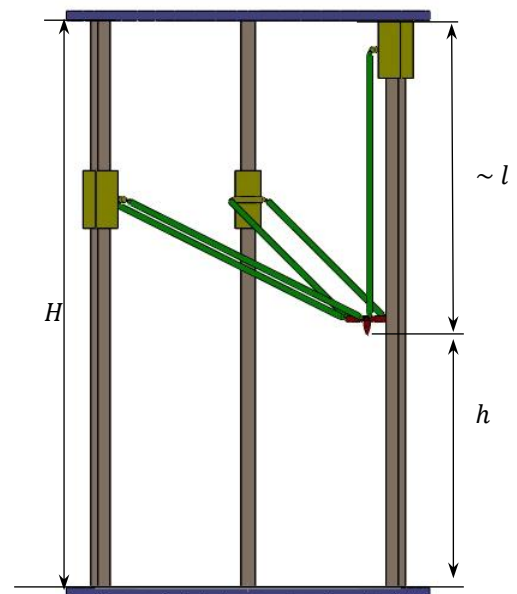
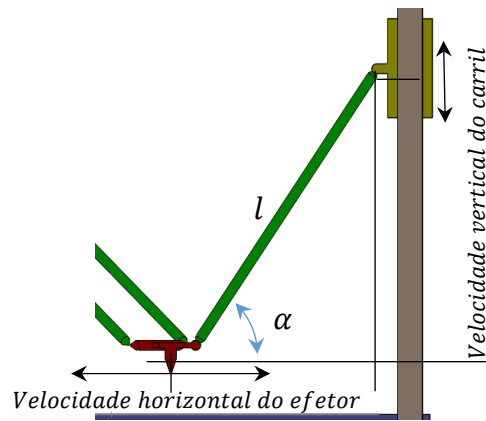


Figura 46 - Cálculo da altura das torres em função da altura de impressão desejada. (H - comprimento das torres; h - altura de impressão; l - comprimento dos braços)

4.1.1.4 Velocidade e Resolução

Através das relações trigonométricas na cinemática do sistema é possível calcular a relação entre a velocidade vertical dos carris e a velocidade horizontal resultante no efector. Considerando que estas translações ocorrem num plano perpendicular à base da impressora, (fig. 47) é possível conhecer relação entre estas velocidades.

Posto isto, o quociente entre a velocidade do carril e a velocidade horizontal do efector dá origem a uma quantidade a que chamaremos fator de multiplicação [79]. O ângulo α deve ser limitado pelas as situações em que os braços se encontram numa posição horizontal ($\alpha=0^\circ$) ou vertical ($\alpha=90^\circ$).



$$\begin{aligned} \text{fator de multiplicação} &= \frac{\text{velocidade vertical do carril}}{\text{velocidade horizontal do efetor}} \\ &= \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{1-\cos^2(\alpha)}} \quad (1.5) \\ &0^\circ < \alpha < 90^\circ \end{aligned}$$

Figura 47 - Relação entre a velocidade vertical dos carris e a velocidade horizontal do efetor (fator de multiplicação) [79].

Como o ângulo α depende da posição do efetor, o fator de multiplicação varia consoante a sua posição. Observando a figura 48, é possível concluir que esta relação não é linear. Para ângulos α baixos, o que representa um maior afastamento do efetor em relação a uma das torres, o fator de multiplicação assume os valores mais elevados. Este aumento tem um comportamento quase exponencial quando o ângulo α toma valores próximos de zero. Para um valor de α de 20° , por exemplo, esta situação significa que os carris verticais precisam de se movimentar 2.75x (tabela 5) mais rápido do que o efetor para impor a este uma velocidade constante.

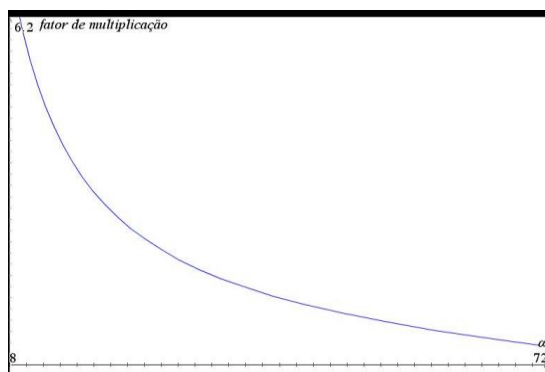


Figura 48 - Variação do fator de multiplicação em função do ângulo α .

Tabela 5 - Fator de multiplicação em função de vários valores de alfa.

α	Fator de multiplicação
10°	5,67
20°	2,75
30°	1,73
40°	1,19
45°	1
50°	0,84
60°	0,58
70°	0,36

As impressoras delta têm a particularidade de não terem uma resolução constante na sua área de trabalho [80]. Partindo do princípio que os motores de acionamento fazem mover os carris verticalmente através de intervalos discretos, é possível calcular a resolução de posicionamento do efetor. De modo a quantificar esta resolução, estabeleceu-se uma relação entre a translação vertical de um carril e a translação horizontal do efetor. A resolução de posicionamento do efetor, dada pelas variáveis y_- e y_+ , pode ser calculada a partir dos incrementos iguais nos carris, representados pelas variáveis h_- e h_+ (fig. 49).

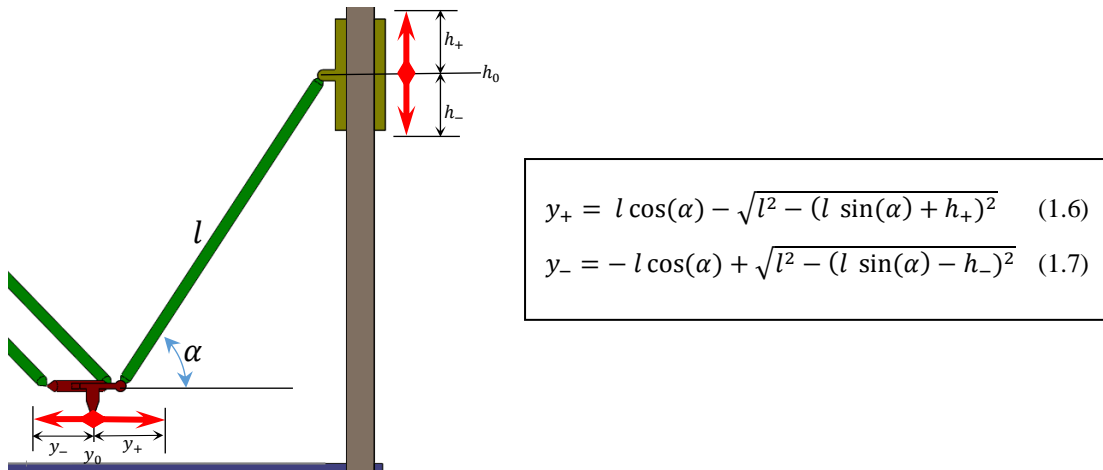


Figura 49 - Resolução de posicionamento horizontal do efector em função de incrementos verticais da posição do carril, em torno de um ponto central.

A resolução horizontal do efector varia em função do ângulo α e, por isso, em função da posição deste no plano. O cálculo apresentado acima não considera as contribuições dos outros braços para esta resolução, mas servirá para um fazer cálculo representativo desta quantidade de forma conservativa. Consequentemente, espera-se uma resolução sempre maior do que a calculada a partir destas expressões. Note-se também que a resolução aumenta quando o efector se encontra em zonas mais afastadas da torre (ângulos α baixos). Uma forma de obter elevadas resoluções no plano seria, por exemplo, diminuir o tamanho dos braços mantendo o diâmetro da máquina constante. Em contrapartida, a área de impressão seria mais pequena.

4.1.2 Estabelecimento das dimensões gerais da máquina

Compreendendo agora as relações entre as várias dimensões dos componentes mais importantes no que diz respeito à cinemática, é necessário seguir uma estratégia de dimensionamento. Excluiu-se a hipótese de fazer um dimensionamento ótimo que passaria por criar um algoritmo de resolução iterativo com o objetivo de satisfazer as características pretendidas [81, 82]. Será, portanto, efetuada uma abordagem empírica ao problema. Este método baseia-se em usar algumas regras práticas que servirão como ponto de partida para o dimensionamento. Como desvantagem oferece menos controlo sobre as características finais da máquina, nomeadamente a resolução e velocidade máxima de translação.

A página web do projeto *RepRap* [79] possui algumas informações úteis para o dimensionamento de máquinas delta. Uma das sugestões é a limitação dos ângulos formados entre os braços e o efector. É sugerido que o ângulo alfa mínimo não seja inferior a 20° e que o ângulo alfa no centro ronde os 60° . Através destes ângulos é possível obter uma proporção equilibrada entre o diâmetro da máquina e o diâmetro de impressão.

No que diz respeito às restantes dimensões, estabeleceu-se que o diâmetro de impressão será o parâmetro mais importante a satisfazer. Permitir a montagem do bico extrusor selecionado será também um aspeto importante a ter em conta.

O diâmetro mínimo de impressão estabelecido foi de 200mm. Para efeitos de dimensionamento deu-se uma margem de segurança de 15mm em todo o perímetro de impressão, logo:

$$D_I \approx 230mm$$

As expressões 1.1 e 1.2 podem ser igualadas e resolvidas em ordem a l :

$$l = \frac{D_I}{2 \times (\cos(\alpha_{\text{mínimo}}) - \cos(\alpha_{\text{origem}}))} \quad (1.8)$$

Considerando que $\alpha_{\text{mínimo}} = 20^\circ$ e $\alpha_{\text{origem}} = 60^\circ$:

$$l \approx 261,5 \text{ mm}$$

De modo a usar um valor inteiro para o comprimento dos braços, considerou-se um l de 260mm.

Para o extrusor selecionou-se um *diamond hotend* [83] (fig. 50). Este está equipado com três entradas que permitem a alimentação de três filamentos. Como possui apenas um orifício para extrudir o material, é possível misturar diferentes materiais. Este extrusor é o único do seu tipo disponível do mercado. O interesse em selecionar o extrusor a usar foi essencial para poder dimensionar o efetor que deverá permitir a sua montagem. Numa fase posterior, será feita uma análise mais detalhada sobre este extrusor, referindo aspetos de funcionamento, montagem e configuração.



Figura 50 - Extrusor de mistura "*diamond hotend*" selecionado para o sistema de extrusão [83] .

Tendo em conta que o bico extrusor tem um diâmetro de 30mm, estabeleceu-se um diâmetro para o efetor de 50mm (fig. 51). Esta dimensão deverá ser suficiente não só para permitir o afastamento entre o bico, que atingirá temperaturas elevadas, e o próprio efetor mas também fazer a interface de montagem entre os dois componentes. Numa fase posterior será desenvolvida uma peça para permitir esta montagem.

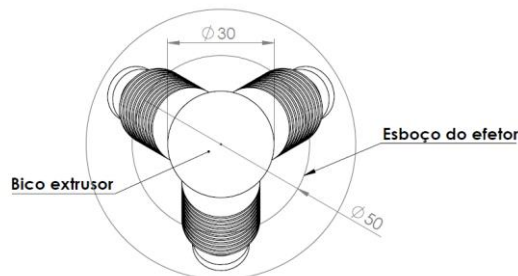


Figura 51 - Esboço do efetor para permitir a montagem do *diamond extruder*.

Resolvendo a expressão 1.1 em ordem a D_M conclui-se que $D_M = 320mm$.

Tabela 6 - Principais dimensões da máquina estabelecidas.

Variável	Significado	Dimensão (mm)
D_I	Diâmetro de impressão	200
D_M	Diâmetro da máquina	320
l	Comprimento dos braços	260
O_E	Offset do efetor	25

4.2 Desenho detalhado

A partir das dimensões gerais para os principais componentes, passou-se ao desenho detalhado dos mesmos. Estes foram desenhados em *software* de CAD, nomeadamente o *Solidworks*. O interesse em desenhar previamente os componentes num ambiente virtual permitiu a iteração de diferentes conceitos e soluções no que diz respeito à montagem e funcionamento da máquina. A obtenção dos desenhos em CAD foi também essencial para a manufatura dos componentes desenvolvidos já que se usou diferentes processos de fabrico por controlo CNC, como a impressão 3D e maquinagem CNC.

Ao longo do desenho detalhado foram selecionados diversos componentes, justificando os critérios de escolha e possíveis alternativas. Explicou-se também o seu modo de funcionamento, os detalhes de montagem, os materiais e processos de fabrico selecionados para as peças desenvolvidas.

Houve a necessidade de fazer algumas previsões e verificações sobre o funcionamento da máquina. Em consequência da falta de informação sobre as cargas envolvidas no sistema de movimentação da impressora, foram feitas várias simplificações e formuladas hipóteses consideradas conservativas que auxiliaram no dimensionamento da máquina.

Embora durante o desenvolvimento dos componentes, não se tenha seguido uma sequência linear, para efeitos de apresentação e documentação deste projeto definiu-se uma sequência que pareceu representar melhor o processo de uma forma intuitiva (fig. 52). Esta sequência teve em conta as relações entre as diferentes peças ou módulos desenvolvidos. Esta fase focou-se no desenvolvimento da parte estrutural da impressora, selecionando alguns componentes eletrónicos. Num capítulo seguinte, focou-se na explicação do funcionamento e seleção dos restantes componentes eletrónicos necessários para o controlo da máquina.

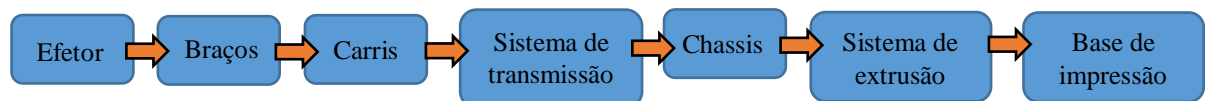


Figura 52 - Sequência seguida para o desenho detalhado dos componentes.

4.2.1 Efetor

Tendo em conta as explicações dadas anteriormente, começou-se por desenhar o efetor. Optou-se por fazer o efetor a partir de chapa alumínio para ser fabricado por punção. Através deste processo de fabrico será possível obter uma boa precisão dimensional e, por ser feito em alumínio, este componente terá uma elevada rigidez específica, desejável para esta peça.

Decidiu-se usar rótulas magnéticas para fazer a ligação entre o efetor e os braços. Esta solução, para além do seu baixo custo, transmite, em teoria, os movimentos entre estes componentes sem folgas [84]. É uma solução prática do ponto de vista da manutenção da

máquina, pois permitirá a desmontagem do efetor sem recorrer a ferramentas. Em contrapartida, a força de atração magnética, que não é conhecida, deverá ser superior às forças no sistema de movimentação tais como o peso próprio destes componentes e as forças dinâmicas geradas pelo movimento dos mesmos. A rótula selecionada consiste no conjunto formado por uma esfera com 10mm de diâmetro e por um íman com forma cilíndrica (fig. 53). A esfera possui um furo cego com rosca métrica M4.

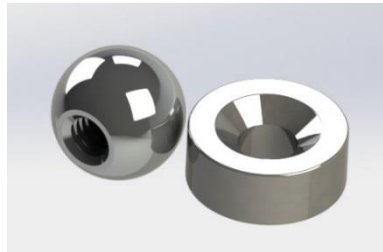


Figura 53 - Conjunto esfera/íman que compõem a rótula magnética.

Considerando as escolhas apresentadas acima, desenhou-se o efetor (fig. 52). Este foi desenvolvido de forma a ser o mais pequeno possível. Neste momento definiu-se também o afastamento entre os braços que formam cada um dos três paralelogramos presentes na configuração delta. Tendo em conta a dimensão do efetor, definiu-se o afastamento entre os braços de 60mm (fig. 54). Este afastamento foi maximizado de modo a conferir uma boa estabilidade ao efetor [79] e, ao mesmo tempo, garantir que não haverá qualquer interferência no funcionamento das rótulas.

O efetor possui vários furos que vão permitir a montagem do bico extrusor e de outros componentes auxiliares, tais como ventoinhas de refrigeração.

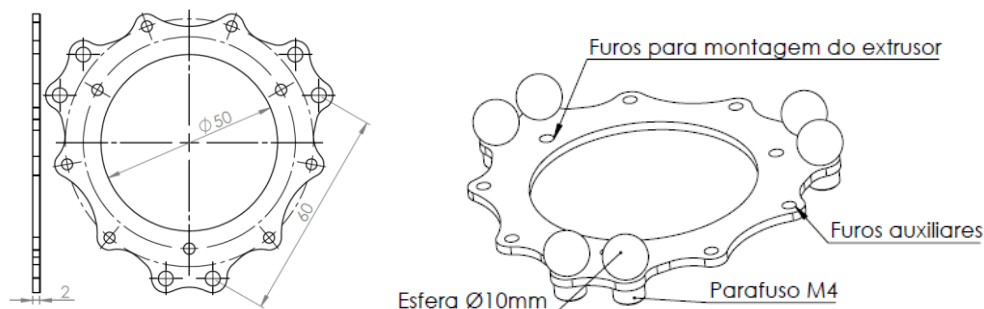


Figura 54 – Efetor.

4.2.2 Braços

Os braços são componentes com grande influência no funcionamento da máquina. Para além de leves e rígidos, o seu comprimento deve ser constante e bem conhecido. A variação de alguns milímetros no seu comprimento acarreta erros significativos de posicionamento do efetor [85]. Posto isto, desenvolveu-se uma solução que permite o ajuste do seu comprimento através do aperto de um parafuso na extremidade. Com um par de porcas, o comprimento efetivo do braço pode ser bloqueado. A viga do braço consiste num tubo de alumínio com 6mm de diâmetro exterior e com um diâmetro interior com pouco menos de 4mm de diâmetro interior que permite roscar parafusos M4. Ambas as extremidades do braço possuem umas junções poliméricas que fazem a ligação entre o tubo do braço e o íman (fig. 55).

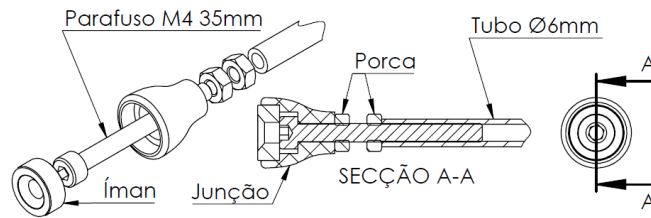


Figura 55 - Detalhe da extremidade de um braço.

Sabendo que o comprimento nominal dos braços é de 260mm, o tubo medirá cerca de 200mm, sendo que o restante comprimento é assegurado pelos parafusos, esferas e restantes componentes (fig. 56).

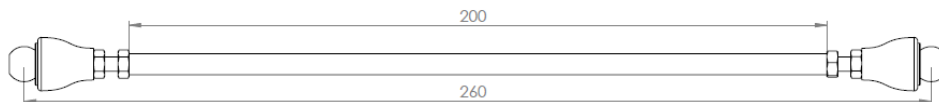


Figura 56 - Comprimento nominal do braço.

4.2.3 Carris

O deslizamento linear entre o carril e a torre será feito por um conjunto de rodas deslizantes. Estas rodas consistem num par de rolamentos montados numa roda feita em poliacetal. Este material é bastante rígido, apresenta uma baixa fricção de contacto e é capaz de absorver algumas vibrações, o que o torna ideal para esta aplicação. Esta solução é muito comum na construção de impressoras 3D. Estes componentes são baratos e de elevada disponibilidade no mercado. A superfície radial apresenta uma ranhura inclinada concebida para ser montada em vigas de alumínio extrudido *v-slot* [86].

O perfil escolhido foi o modelo 2040 *v-slot* que se refere a uma viga com secção transversal com 20x40mm (fig. 57). Para além de fazer a interface de montagem entre o carril e a torre, estas vigas vão desempenhar um papel estrutural no chassis da máquina. Naturalmente, as forças associadas ao funcionamento da máquina serão bastante inferiores às forças máximas de previstas para estes perfis. Porém esta escolha acaba por conferir à estrutura da máquina uma maior rigidez e uma massa elevada, o que é desejável para a estabilidade de toda a estrutura. Na gama destes perfis, o mais modesto é o 2020, com uma secção quadrada de 20x20mm. Apesar de ser uma solução viável, a diferença de preços entre estes dois modelos não é significativa, o que reforçou a seleção do perfil 2040. O comprimento destes perfis será de 1m que, a partir da expressão 1.4, será suficiente para atingir uma altura de impressão de 500mm.

Figura 57 - Conjunto roda deslizante [87] e perfil *v-slot* [86] usado como rolamento linear.

Decidiu-se usar chapa de alumínio para a concepção da estrutura dos carris, utilizando quatro rodas por carril (fig. 58). Algumas máquinas fazem uso de apenas três rodas por carril, o que pode ser benéfico na redução do peso total de cada carril. No entanto, considerou-se que o uso de quatro rodas será mais adequado para absorver as forças e momentos transmitidos pelos braços às torres.

Um dos lados do carril apresenta uma ranhura que permite o deslizamento do eixo das rodas de modo a ajustar o contacto entre as estas e o perfil. Esta solução acaba também por facilitar a montagem dos carris no perfil.

Tal como no efetor, as esferas são montadas com parafusos com um afastamento de 60mm entre si. Na parte de trás estão montados uns espaçadores cilíndricos que permitem a inclinação dos braços sem que estes contactem na chapa frontal do carril. O *offset* do carril é de 17mm. Esta medida será importante para calcular o tamanho do chassis, de forma a que o diâmetro da máquina (D_M) seja de 320mm.

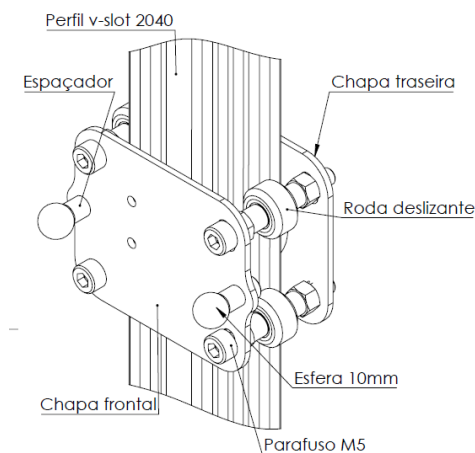


Figura 58 - Carril.

4.2.4 Solicitações mecânicas

Até agora foram desenhados os componentes da parte móvel da máquina (fig. 59). Conhecer a massa deste conjunto será útil para calcular as cargas provocadas associadas ao seu peso e inércia.

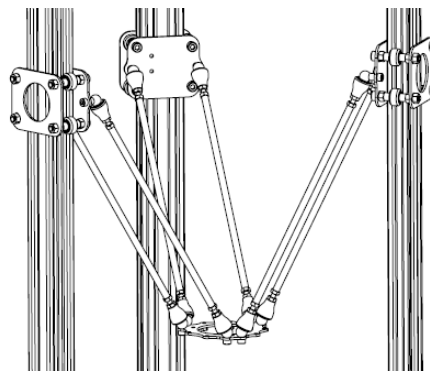


Figura 59 - Montagem da parte móvel: efetor, braços e carris.

Através do *software Solidworks* calculou-se a massa aproximada destes componentes atribuindo-lhes os respetivos materiais de que são feitos. Estas massas foram calculadas e compiladas na tabela 7.

Tabela 7 – Previsão das massas para os componentes que compõem a o conjunto móvel.

Conjunto	Massa unitária (g)	Massa total (g)
Efector e extrusor	~44 e ~150	194
Braços	~33	198
Carris	~112	336

No conjunto formado pelo efector e extrusor não estão contabilizadas as massas dos restantes componentes, como a peça que vai permitir a montagem do extrusor à chapa do efector. Por esta razão, somou-se a este conjunto uma massa de 100g, que representa a massa total desses componentes. Por consequência será considerado que a massa total do conjunto do efector rondará os 300g.

Tendo agora uma aproximação da massa dos componentes da parte móvel da máquina, é possível prever algumas das cargas atuantes neste sistema. Este cálculo servirá para assegurar que as rótulas possuem uma força magnética superior às cargas do sistema e servir como referência na seleção de um motor de acionamento adequado.

Em primeiro lugar considerou-se o facto de que a deposição de material neste método de fabrico não provoca solicitações significativas no sistema. Desprezando estas cargas, as solicitações atuantes no sistema estarão relacionadas com o peso próprio do conjunto e com as forças dinâmicas associadas. Ambas estas forças podem ser calculadas pela 2ª Lei de Newton, conhecendo quais as massas e respetivas acelerações.

Após uma breve pesquisa em vários fóruns de impressão 3D, o valor de aceleração máxima com que muitas máquinas vêm configuradas por defeito ronda os 2000 mm/s^2 . Este valor corresponde à aceleração no sistema de movimentação linear que, neste caso, se refere à aceleração dos carris. Tomando o valor extremo para o fator de multiplicação calculado anteriormente, de 2.75, a aceleração máxima no efector será de 5500 mm/s^2 .

Serão feitos dois cálculos distintos para as cargas no sistema. No primeiro será considerado que o efector possui uma massa concentrada que engloba as massas do próprio efector, extrusor e de todos os braços. Este cálculo servirá para compreender quais as forças mínimas necessárias nas rótulas magnéticas dos carris para que não ocorra o desacoplamento indesejado dos mesmos durante o funcionamento da máquina. No segundo será considerada uma massa concentrada num dos carris que assume a massa de todo o conjunto móvel.

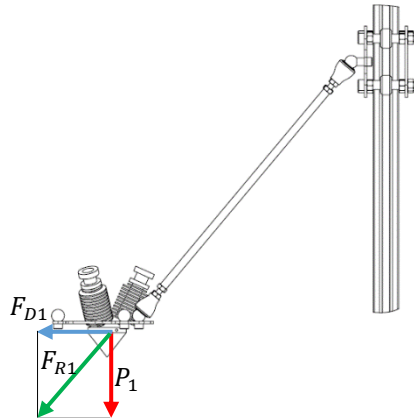
De modo a simplificar esta análise, será tomado em consideração apenas um par de braços, o efector e um dos carris. Na verdade, os restantes pares de braços também estão sujeitos às cargas do efector. O facto de ignorar a contribuição dos outros pares de braços assume uma carga aplicada maior do que será aplicada na prática, o que permitirá fazer um dimensionamento conservador.

4.2.4.1 Verificação das cargas nas rótulas magnéticas

Calculou-se as forças resultantes a partir dos parâmetros definidos acima (tabela 8). As forças dinâmicas serão paralelas ao plano de impressão enquanto as forças geradas pelo peso serão perpendiculares (fig. 60). De modo a verificar as cargas nas rótulas considerou-se que a

força resultante é colinear com o próprio braço o que significa que a esta força pode ser verificada experimentalmente, desde que seja medida numa direção normal à rótula.

Tabela 8 - Cálculo da força resultante no efetor.



Massa concentrada	$300\text{g} + 198\text{g} = \mathbf{498\text{g}}$
Peso (P_1)	$498\text{g} \times 9,8\text{m/s}^2 = \mathbf{4,88\text{ N}}$
Força dinâmica (F_{D1})	$498\text{g} \times 5,5\text{m/s}^2 = \mathbf{2,74\text{ N}}$
Força resultante (F_{R1})	5,60 N

Figura 60 - Força resultante no efetor.

De modo a verificar se a força magnética das rótulas era compatível com as cargas acima calculadas, criou-se uma peça que permite a montagem do íman. Esta peça, semelhante aos braços desenhados acima, possui uma argola numa das extremidades para permitir tracionar a rótula até provocar o seu desacoplamento. A tração da rótula foi feita manualmente de forma lenta em que foram registadas as forças máximas medidas. Estas forças foram medidas com um dinamómetro digital (fig. 61). Fez-se este ensaio para vários conjuntos de esferas e ímanes de modo a poder detetar alguma possível variabilidade na força de contacto. As forças máximas medidas, no entanto, foram consistentes tendo-se registado uma força máxima de tração de 6,5N.



Figura 61 - Medição da força máxima de tração das rótulas magnéticas com um dinamómetro digital.

Após esta medição, foi possível verificar que as rótulas magnéticas seleccionadas serão adequadas para esta aplicação. A força de contacto calculada anteriormente, de 5,6N, é cerca de 15% inferior à força medida. Para as condições impostas, calculou-se que ocorrerá o desacoplamento das rótulas quando a aceleração do efetor for superior a 8600mm/s^2 . É importante lembrar que os cálculos para as forças feitas anteriormente tomaram uma perspetiva bastante conservadora. Prevê-se que as cargas normais nas rótulas nunca atinjam este valor. Na verdade, esta força estará sempre distribuída pelos restantes braços que estão ligados ao efetor, nunca ocorrendo uma situação em que apenas um dos braços absorve todas as forças aplicadas no mesmo.

4.2.4.2 Cálculo das cargas nos carris

De forma semelhante, calculou-se as cargas aplicadas num dos carris. Neste caso as forças dinâmicas e geradas pelo peso terão a mesma direção vertical (fig. 62). A força resultante será máxima quando estas tiverem o mesmo sentido. Esta situação acontece quando a força dinâmica é descendente.

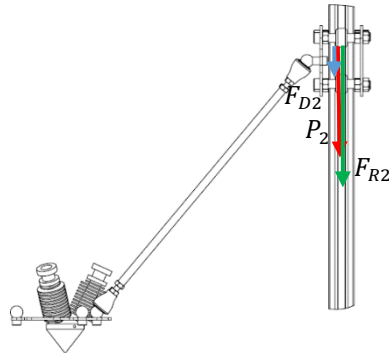


Figura 62 - Força resultante num carril

Tabela 9 - Cálculo da força resultante num dos carris.

Massa concentrada	$300\text{g} + 198\text{g} + 336 = \mathbf{834\text{ g}}$
Peso (P_2)	$834\text{g} \times 9.8\text{m/s}^2 = \mathbf{8,17\text{ N}}$
Força dinâmica (F_{D2})	$834\text{g} \times 2\text{m/s}^2 = \mathbf{1,67\text{ N}}$
Força resultante (F_{R2})	9,84N

Visto que o sistema de movimentação linear estará diretamente ligado ao carril, esta carga calculada será útil para o dimensionamento do mesmo. Para tal será necessário começar por selecionar um sistema de conversão de movimento angular em linear. Posteriormente será possível a seleção de um motor compatível com o binário calculado e com a resolução de posicionamento necessária.

Considerou-se que, para um movimento descendente de todo o conjunto móvel, esta carga seria distribuída de forma igual pelos três carris. Desta forma, a força resultante usada para o dimensionamento do sistema de transmissão será um terço da força total calculada acima, o que corresponde a 3,28N. Esta nova força resultante será designada por F'_{R2} .

4.2.5 Sistema de transmissão

Os motores de passo são uma boa solução para o acionamento do sistema de movimentação por controlo eletrónico. Este controlo pode ser feito com relativa facilidade através do uso de circuito dedicado de baixo custo, chamado controlador. Neste tipo de motores, a sua rotação é feita através de incrementos angulares discretos. O número de passos por volta determina a resolução do mesmo, sendo que os valores mais comuns são de 200 ou 400 passos por volta. Por consequência, estes motores são capazes de rodar através de incrementos de 1.8° ou 0.9° , respetivamente.

A técnica de controlo por “*microstepping*” é uma forma de aumentar a resolução efetiva do motor e de tornar a rotação do motor mais suave. Em contrapartida, o binário efetivo reduz bastante. Através desta técnica, e para motores de passo bipolares, é possível o aumento da resolução por fatores de 2, 8, 16 ou 32 [88]. O binário efetivo não decresce com o mesmo fator, como será mostrado mais à frente.

Em impressoras 3D de baixo custo, não é costume a implementação de sistemas de *feedback* de posição dos motores de passo. O controlo em malha aberta é indicado apenas para sistemas de movimentação que operam com velocidades baixas em que as cargas são relativamente pequenas ou estáticas [36, 89]. Assim, estas máquinas não são capazes de detetar e corrigir a sua posição em função de possíveis perturbações exteriores. No sentido de simplificar a construção e controlo da máquina, não será implementado um sistema de *feedback* de posição.

O sistema de transmissão escolhido para converter o movimento angular do motor em movimento linear dos carris foi um sistema de duas polias ligados por uma correia. Esta solução permite a transmissão de movimento com poucas folgas que podiam introduzir erros de posicionamento. Este sistema é também mais prático, tendo em conta o curso necessário para os carris, do que os sistemas de fusos, por exemplo. Por não terem autobloqueio, característica comum em sistemas de fuso, o bloqueio de posição é assegurado apenas pelo binário resistente do motor quando este se encontra desligado. No entanto, este aspeto pode ser positivo por permitir o posicionamento manual do efector quando a máquina está desligada, o que torna mais prática a remoção de peças da base de impressão ou manutenção do sistema de movimentação da impressora.

O tipo de correia seleccionada foi o modelo GT2, com um passo de 2mm e com 6mm de espessura. Escolheram-se polias de 20 dentes pelo facto de serem divisíveis pelas 200 ou 400 divisões dos motores de passo o que não acontece com polias de 16 dentes.

Por fim, este conjunto deverá satisfazer três condições importantes: oferecer curso suficiente para a movimentação vertical dos carris, ter um fator de redução adequado em função da precisão necessária, e possuir um binário compatível com as cargas atuantes no sistema.

A tabela 10 mostra a influência do controlo para vários modos de *microstepping* na redução do binário e no aumento da resolução linear dos carris. O binário disponível é apresentado como uma percentagem do binário máximo indicado para o motor. Os cálculos assumem um motor de passo com 200 passos e um sistema de polias de 20 dentes com correias GT2. Esta tabela foi construída com o auxílio de uma calculadora, disponível na *internet*, que permite o cálculo teórico da resolução linear em função do tipo de motor de passo e do sistema de transmissão [90, 91].

Tabela 10 - Binário disponível e resolução linear teórica para um sistema de transmissão acionado por um motor de passo com 200 divisões e um sistema de polias GT2 com 20 dentes, controlados por diferentes modos de *microstepping*.

Modo de controlo por <i>microstepping</i>	Binário disponível (% do binário máximo do motor)	Resolução linear teórica (μm)
1	100	200
1/2	70,71	100
1/4	38,27	50
1/8	19,51	25
1/16	9,80	12,5
1/32	4,91	6,25

Pela análise da tabela é possível obter uma resolução linear teórica de 12,5 μm usando o sistema de transmissão acima referido, através da combinação considerada. Para atingir esta resolução, o modo de controlo por *microstepping* deve ser de 1/16. Desta forma, são necessários 80 passos para que translada 1mm no carril. Em contrapartida, o binário disponível é de apenas 9,80% do binário máximo do motor. Este aspeto será determinante na seleção de um motor de passo adequado.

Esta resolução linear é 8x superior à resolução de camada estabelecida. O facto de ter um sistema de posicionamento com maior resolução do que a resolução de camada que a impressora poderá imprimir é benéfico, pois a resolução no plano XY, para a configuração delta, é maior. A partir das expressões 1.6 e 1.7, calculou-se uma resolução no plano XY mínima de,

aproximadamente, $92\mu\text{m}$. Para este cálculo considerou-se um ângulo α de $82,3^\circ$ que corresponde à posição do efetor mais próxima da torre, para o diâmetro de impressão estabelecido.

A potência do motor é proporcional à corrente que lhe é fornecida [88]. Grande parte dos circuitos integrados para o controlo de motores de passo permitem o ajuste da corrente máxima. Não é aconselhado o seu funcionamento à corrente máxima indicada pelo fabricante, pois pode provocar o seu aquecimento e reduzir o seu tempo de vida útil. Posto isto, será proposto o funcionamento a 75% da sua capacidade máxima. Assim, com uma redução de 25% na corrente máxima, o binário útil será reduzido pela mesma proporção. Contabilizando a redução de binário pelo modo de controlo, o binário útil representará apenas 7,3% do binário máximo do motor, o que equivale a uma redução de 92,7% (fig. 63).

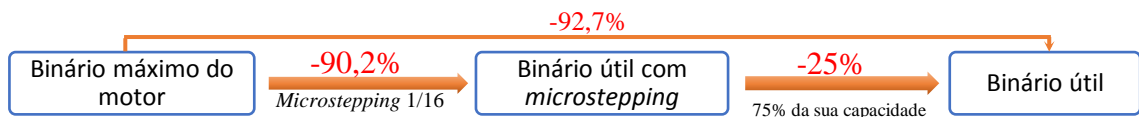


Figura 63 - Redução de binário útil do motor devido ao controlo *microstepping* e por operar a 75% da sua capacidade máxima.

Em alternativa, poderia ser usado um motor com uma maior resolução, como um motor com 400 passos por volta. No entanto, para operarem a uma mesma velocidade do motor de 200 passos por volta é necessário um controlador que envie os comandos de controlo duas vezes mais rápido. Ao seleccionar o motor com menos resolução nominal é viável a adoção de um microcontrolador mais modesto em relação à sua velocidade de processamento. Outro fator que influenciou esta escolha foi o custo desta solução que, para alguns fornecedores, custa metade quando comparados com a alternativa apresentada.

Motores de passo com a designação NEMA são bastante comuns no mercado e o seu custo tem vindo a decrescer com o aumento recente da sua procura. Esta designação refere-se apenas à dimensão da flange de montagem [88] e não está diretamente relacionada com as características do motor. Os motores NEMA 17 são bastante usados em impressoras 3D enquanto os NEMA 14 e os NEMA 23 são menos usuais para esta aplicação. Os binários máximos para os motores NEMA 17 situam-se, normalmente, entre os 13N.cm e os 65N.cm, dependendo do modelo exato.

Sabendo o diâmetro da polia e a carga no carril, é possível calcular o binário do motor necessário para esta aplicação (tabela 11). A figura 64 descreve o modo de aplicação destas cargas.

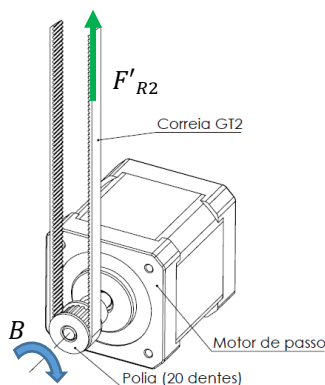


Tabela 11 - Cálculo do binário.

Força no carril (F'_{R2})	3,28 N
Diâmetro da polia	12,73 mm ([92])
Binário (B)	2,08 N.cm

Figura 64 - Sistema de acionamento linear composto por um motor de passo e sistema de polias e correia GT2.

Desta forma, o binário calculado na tabela 11 corresponderá ao binário útil. Considerando as reduções mostradas anteriormente, o binário máximo do motor a selecionar deverá ser superior a 15,3 N.cm.

Selecionou-se o motor passo 17HS16-2004S (fig.62) [93]. O binário máximo deste motor é de 45N.cm. Este binário é cerca de três vezes superior ao binário mínimo necessário e será adequado para suportar as cargas consideradas. Através deste sobredimensionamento será possível combater forças de atrito presentes no sistema de transmissão e nas rótulas magnéticas que não foram contabilizadas nas fases anteriores. Outra razão para a escolha deste motor foi o facto do custo destes motores não variar significativamente para binários entre os 13N.cm e os 50N.cm. Uma razão adicional é o facto de o binário útil decrescer bastante em função da velocidade de operação [94].

Este motor possui um veio com 5mm de diâmetro com uma face plana que permite o bloqueio da polia com um parafuso. Possui uma flange de montagem, quadrada, com quatro furos cegos com rosca métrica M3 (fig. 65).

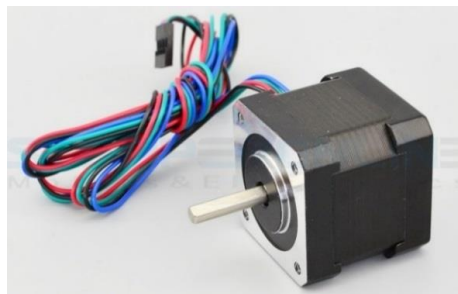


Figura 65 - Motor de passo NEMA 17 - 17HS16-2004S, usado para o acionamento do sistema de movimentação [93].

Foi desenhado um sistema de acoplamento entre a correia e a chapa frontal do carril (fig. 66). Consiste numa pequena peça que permite o tensionamento da correia e que é presa através do aperto de dois parafusos da parte frontal. A geometria e o posicionamento desta peça foram feitos de forma a não interferir com o movimento dos braços.

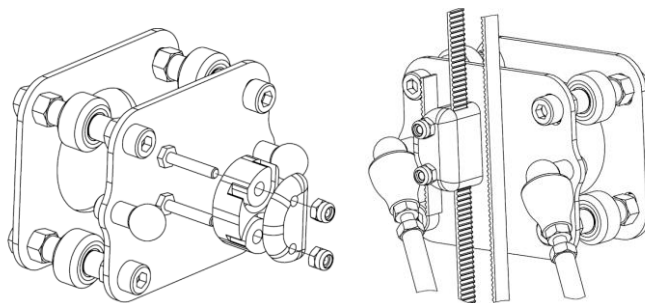


Figura 66 - Peça de fixação da correia ao carril.

4.2.6 Chassis

O chassis da máquina corresponde a toda a estrutura de suporte que tem como principais funções suportar todos os outros componentes, oferecer uma plataforma de montagem e absorver cargas e vibrações provenientes dos componentes móveis.

Para a estrutura da máquina optou-se pela configuração triangular. Esta opção consiste numa estrutura composta por vigas ligadas por cantos que se assemelha a um prisma triangular. Em alternativa, e tendo em conta a simetria deste tipo de máquina, seria possível uma configuração hexagonal. Esta opção, no entanto tornaria a estrutura mais complexa e menos robusta o que é um aspeto indesejável para esta aplicação [95]. O maior número de peças seria também um aspeto negativo em termos de fabrico e montagem.

Como já foi referido anteriormente, as vigas *v-slot* selecionadas farão parte do chassis pois desempenham um papel estrutural importante. Estas vigas, que serão as torres da máquina, terão de ser ligadas a um conjunto de vigas laterais que formarão a base e o topo desta. Para as estas vigas laterais serão usados perfis de alumínio extrudidos do tipo Bosch. Para as vigas laterais da base serão usados perfis 30x60 e para o topo perfis 30x30. Tal como as vigas *v-slot*, estas denominações dizem respeito à dimensão da secção da viga que é de 30x60mm para o modelo 30x60 e 30x30mm para o modelo 30x30 [96]. Todos estes perfis foram reaproveitados de outros projetos feitos no INEGI.

A partir dos cálculos de dimensionamento feitos anteriormente, cada uma destas vigas terá 325mm de comprimento para obter o diâmetro da máquina desejado. Este comprimento tem em conta o afastamento dos braços em relação às torres.

4.2.6.1 Cantos

Para fazer as ligações entre as várias vigas que compõem o chassis desenhou-se umas peças para esse efeito (fig. 67). Estes cantos da estrutura vão assegurar a geometria correta para o chassis assim como permitir a montagem dos motores de passo na zona inferior da máquina. A montagem dos motores de passo para a transmissão de movimento na parte de baixo do chassis é uma solução comum para impressoras delta pois ajuda a baixar o centro de gravidade da máquina. Nos cantos inferiores foi feita uma ranhura para permitir a passagem de cabos elétricos que passarão pelo centro dos perfis das torres. Nos cantos superiores serão montadas as polias mandadas que constituem o sistema de transmissão.

Os cantos foram desenhados para serem impressos por FDM em PLA. Esta solução permitirá o seu fabrico de uma forma rápida e barata. Visto que se trata de um material polimérico com uma rigidez relativamente baixa, estes cantos poderão absorver vibrações residuais emitidas pelos motores e pelo sistema de transmissão. Por outro lado, a sua geometria deve garantir uma robustez elevada, de modo a suportar as cargas de funcionamento da máquina.

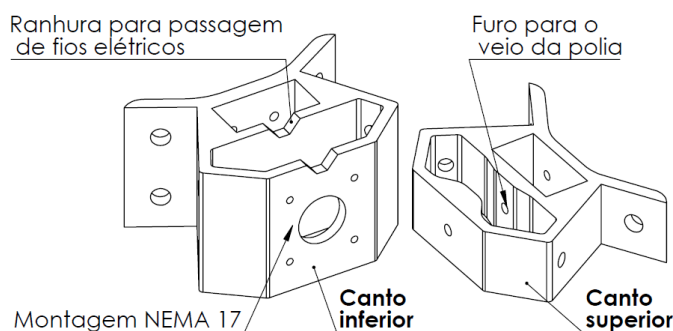


Figura 67 - Cantos inferiores e superiores do chassis.

A interface entre os cantos e os perfis será feita através de ligações aparafusadas, usando porcas “T” para a sua fixação nas ranhuras dos perfis. (fig. 68)

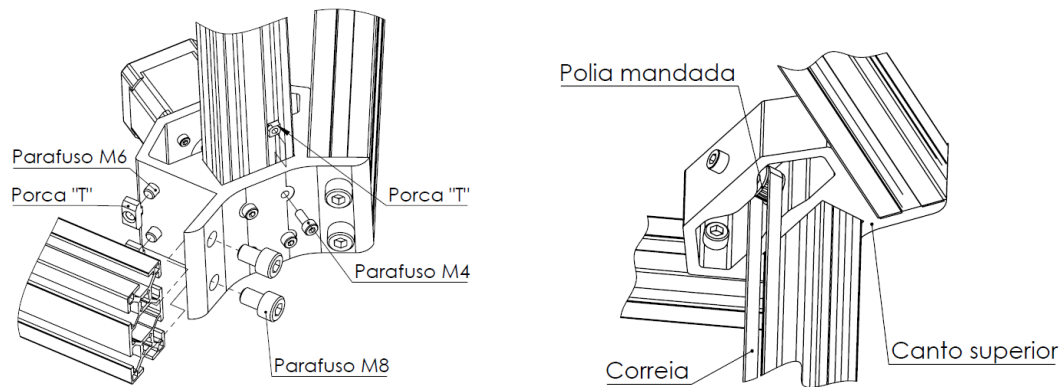


Figura 68 - Detalhes da interface entre os perfis e o canto inferior e da montagem do sistema de transmissão.

4.2.6.2 Painéis

A principal função dos painéis do chassi será proteger os componentes eletrônicos e possibilitar a sua montagem nos mesmos. Estes serão instalados na base e no topo, pelo que acabarão por ser a plataforma de montagem para a base de impressão e para os alimentadores de filamento. Ao todo serão feitos quatro painéis: dois para a parte inferior da máquina e dois para o topo (fig. 69).

A forma dos painéis tem em conta a geometria do chassi e os componentes que farão a interface com estes. Estes deverão apresentar vários furos para a passagem de cabos elétricos, da correia do sistema de transmissão, das torres e para possibilitarem a sua montagem nos perfis laterais. Esta será feita com parafusos e respetivas porcas “T”.

O espaço entre os painéis 1 e 2, permitirá a montagem do microcontrolador e da fonte de alimentação enquanto o espaço entre os painéis 3 e 4 servirá para proteger e esconder alguns dos cabos elétricos dos alimentadores de filamento e fins-de-curso.

Entre o painel 1 e a estrutura da máquina será estabelecida uma ranhura em torno do perímetro, de modo a facilitar a circulação de ar. Este pormenor é importante pois alguns dos componentes eletrônicos montados na base serão suscetíveis a aquecer durante o seu funcionamento. A ranhura ajudará na circulação de ar neste compartimento.

Os painéis serão feitos em placas de polietileno reaproveitados de outros projetos feitos no INEGI. Este material é um bom isolante elétrico, é resiliente, barato e apresenta uma boa maquinabilidade [97].

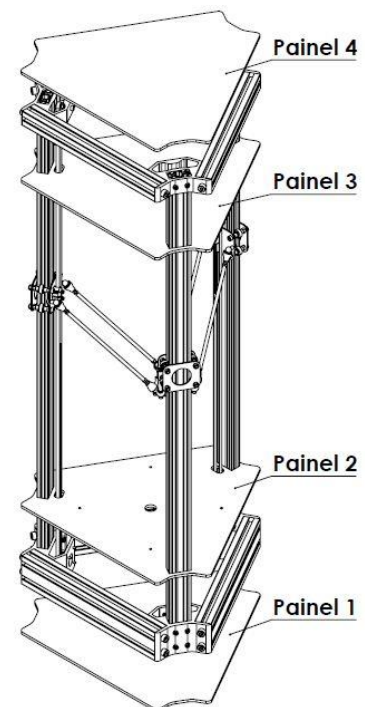


Figura 69 - Painéis dos chassis.

4.2.7 Sistema de extrusão

O sistema de extrusão refere-se a toda a unidade responsável por alimentar, guiar, aquecer e extrudir o filamento. Tal como já foi referido anteriormente, o bico extrusor a usar será o chamado “*diamond extruder*”. Os restantes elementos do sistema de extrusão são o alimentador e o tubo *Bowden* que tem a função de guiar o filamento até ao extrusor (fig. 70) [57]. A utilização de um sistema com um tubo *Bowden* permite que toda a massa do motor de passo e do alimentador fique desacoplada do efetor, permitindo maiores velocidades do mesmo, e menos cargas de origem dinâmica [56]. O tubo *Bowden* é feito de PTFE, que é um material

com baixo atrito superficial e resistente a temperaturas elevadas. Este facto torna-o ideal para guiar o filamento até ao bico extrusor que poderá atingir temperaturas na ordem dos 250°C.

O bico extrusor possui três dissipadores de calor que possibilitam que o filamento esteja ainda no estado sólido quando entra no bico aquecido. Esta solução evita o entupimento de material no canal de entrada. Estes dissipadores devem ser arrefecidos por convecção forçada através de uma ventoinha.

Todos os componentes do sistema de extrusão serão adquiridos no mercado. Estes componentes são modulares, havendo por isso compatibilidade entre diferentes bicos extrusores e alimentadores.

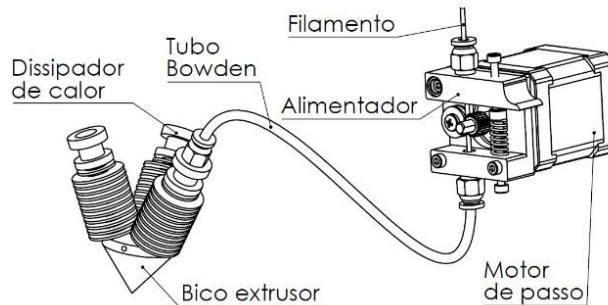


Figura 70 - Sistema de extrusão.

4.2.7.1 Bico extrusor

O bico extrusor é o elemento responsável por aquecer e extrudir o polímero através de um canal. O diâmetro do bico de extrusão é de 0,4mm que é um dos tamanhos mais comuns em sistemas de extrusão de impressoras FDM. Está preparado para ser alimentado por filamentos com 1,75mm de diâmetro. O bico é feito de latão, material que possui uma elevada condutibilidade térmica.

O aquecimento é feito através de uma resistência elétrica montada no bico. O bico de extrusão selecionado está preparado para aceitar resistências de forma cilíndrica, de 40W de potência. Para monitorizar a temperatura do controlador, será usado um termistor. Este bico possui um canal que permite a montagem de um termistor numa zona que fornece leituras aproximadas da temperatura geral do bico (fig. 71). A combinação da resistência de aquecimento e do termistor permite o controlo em cadeia fechada com *feedback* de temperatura.

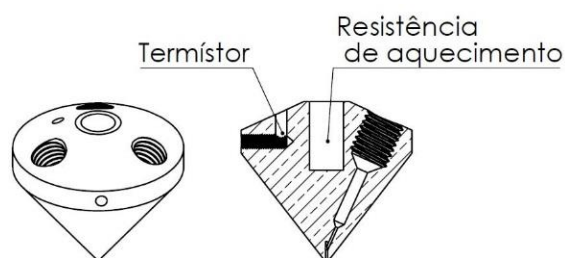


Figura 71 - Detalhe do bico extrusor, mostrando os canais de montagem da resistência de aquecimento e do termistor.

4.2.7.2 Alimentador

O alimentador é o elemento responsável por fornecer uma quantidade definida de filamento ao bico de extrusão. Consiste num mecanismo acoplado a um motor de passo que empurra o filamento dentro do tubo de PTFE (fig. 72). A quantificação de filamento alimentado depende da velocidade e do ângulo de rotação deste motor que é controlado eletronicamente. Para o alimentador selecionado, a tração do filamento é feita através do contacto do filamento com os dentes de uma roda dentada acoplada ao veio do motor. O alimentador possui um sistema basculante que aplica uma força entre o filamento e a roda dentada para assegurar que ocorre tração entre estes. Esta força, provocada por uma mola, pode ser afinada através de um parafuso de ajuste na parte superior do alimentador. O guiamento do filamento é assegurado pelo tubo de PTFE que é ligado ao corpo do alimentador e ao dissipador de calor do bico extrusor através de uns inserts roscados.

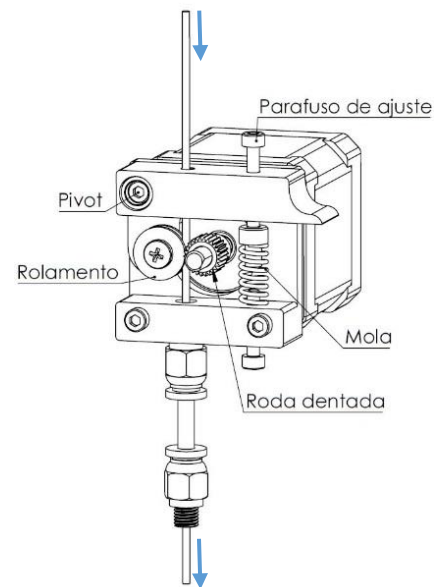


Figura 72 - Detalhe de montagem do alimentador de filamento.

Para o funcionamento correto de qualquer alimentador é essencial que o binário do motor seja suficiente para possibilitar a extrusão do filamento. Este binário depende de vários fatores, tais como a temperatura do bico e os diâmetros do filamento e da roda dentada. Hoje em dia, os filamentos mais comuns para impressoras FDM têm 1,75mm de diâmetro e a maior parte das rodas dentadas são acopladas diretamente ao motor sem qualquer redução. Para filamentos de 3mm, em que são necessárias forças superiores, é mais comum a utilização de alimentadores do tipo *Wade* [98] que possuem um sistema de redução.

O cálculo da força necessária para extrudir o material implica o conhecimento de um elevado número de variáveis entre as quais a geometria do bico extrusor, o acabamento superficial do canal de extrusão, a viscosidade do material, o fluxo de entrada, etc. Felizmente, foi possível encontrar valores experimentais para um alimentador semelhante ao selecionado, acionado por um motor de passo com características muito próximas dos motores escolhidos anteriormente para o sistema de transmissão [99, 100].

Os cálculos experimentais foram feitos com um motor NEMA 17, com um binário máximo de 43N.cm, controlado com uma configuração de 1/8 *microstepping*. Para uma roda dentada de latão, com um diâmetro efetivo de aproximadamente 9,67mm, a força máxima de extrusão calculada foi de cerca de 1,85kgf [100].

Posto isto, espera-se uma força máxima de extrusão semelhante, considerando que serão usados motores iguais aos selecionados para o sistema de transmissão. A compra de conjuntos de motores iguais torna o seu custo unitário mais baixo, o que é desejável para o projeto em questão.

A calibração dos alimentadores, que passa por conhecer o número de passos necessários para que seja alimentado 1mm de filamento, será feita experimentalmente numa fase posterior. Este processo é mais indicado para lidar com o facto de não se conhecer ao certo o raio efetivo para a roda dentada, que pode variar significativamente, dependendo da força de contacto entre a roda dentada e o filamento.

4.2.7.3 Montagem do bico extrusor ao efetor

Para fazer a montagem do bico extrusor ao efetor foi necessário desenvolver uma peça. Esta peça deverá ser capaz de posicionar o bico extrusor no centro do efetor e permitir a sua montagem ao mesmo através de três parafusos. Para além disso, esta peça deve permitir a montagem de uma ventoinha e direcionar o ar de modo a arrefecer os três dissipadores de calor. Devido à sua geometria complexa, esta peça será fabricada por impressão 3D FDM em PLA. Tendo em conta a sua proximidade ao bico extrusor, esta peça deverá ser isolada termicamente nas zonas mais suscetíveis a aquecer para evitar deformações térmicas indesejadas.

Outros aspetos importantes que influenciaram a forma e geometria desta peça foi o facto de se tentar alinhar o centro de massa do efetor ao plano que contém as esferas das rótulas do efetor. Desta forma, os possíveis momentos de origem dinâmica serão minimizados. Outro aspeto importante será evitar o contacto entre os braços e esta peça, assim como permitir que os tubos de PTFE possam ser montados sem obstruções.

A ligação desta peça ao extrusor será feita com abraçadeiras plásticas presas nas extremidades dos dissipadores de calor. A peça será montada na chapa do efetor através de três parafusos com porcas embutidas na própria peça (fig. 73).

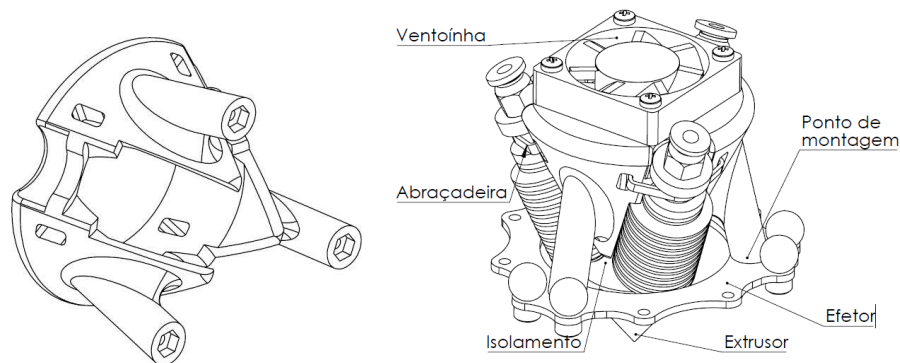


Figura 73 - Peça de ligação do extrusor ao efetor e detalhe de montagem.

4.2.7.4 Arrefecimento do material extrudido

O arrefecimento do material extrudido é um método útil para auxiliar a solidificação do material à saída do bico de extrusão. Esta solidificação permite a impressão de detalhes finos em zonas onde há o risco de o material escorrer devido à acumulação excessiva de calor. Este arrefecimento será feito através de uma ventoinha de 30mm com um canal direcionado para a zona imediatamente abaixo do bico. O controlo da velocidade da ventoinha permitirá controlar a taxa de arrefecimento do material, minimizando possíveis defeitos. A montagem será feita com uma dobradiça que permitirá ajustar a direção do fluxo de ar (fig. 74).

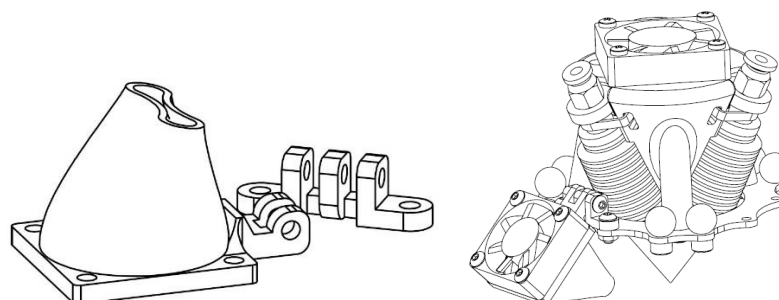


Figura 74 - Montagem do canal de arrefecimento da peça.

4.2.7.5 Montagem dos alimentadores ao chassis

A montagem dos alimentadores ao chassis será feita com umas peças em chapa com furos para que permitam a montagem dos motores (fig. 75). Estas peças serão puncionadas em chapa de alumínio e de seguida dobradas com uma quinadora hidráulica. Os alimentadores serão montados no topo da impressora, de forma a permitir a passagem dos tubos *Bowden* pela parte lateral do chassis (fig. 75). Cada um dos tubos *Bowden* terão cerca de um metro de comprimento para que seja possível a alimentação de filamento quando o extrusor se encontra próximo da superfície de impressão. Este comprimento confere ainda uma certa folga para que os tubos fiquem completamente esticados, o que poderá comprometer a eficácia de alimentação do material. Esta grande distância entre os alimentadores e os extrusores não será a mais indicada para a impressão de filamentos flexíveis [101].

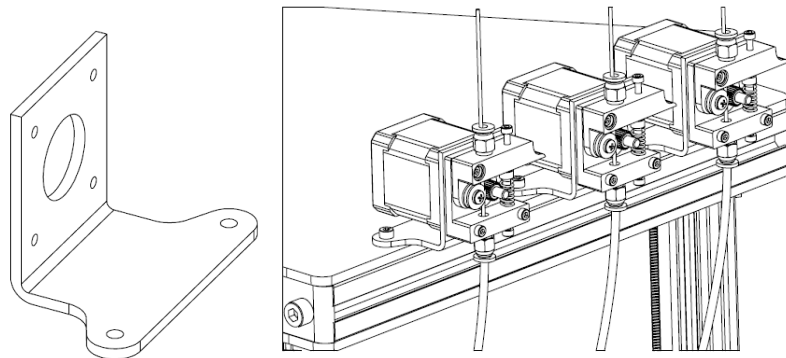


Figura 75 - Peça de montagem para os alimentadores e montagem dos alimentadores no topo da máquina.

4.2.8 Base de impressão

A principal função da base de impressão é fornecer um suporte fixo onde será impressa a peça. Esta superfície deve ser plana e permitir uma boa aderência do material extrudido. Esta adesão pode ser feita por diferentes meios como o uso de adesivos especializados ou películas aderentes descartáveis ou reutilizáveis. Esta escolha pode também ser afetada pelo tipo de material a imprimir.

O uso de bases de impressão aquecidas em impressoras FDM tem vindo a tornar-se mais comum pelos benefícios que oferecem na qualidade de impressão. Para além de ajudarem na adesão entre o material e a base, diminuem os efeitos das contrações térmicas especialmente nas primeiras camadas de material. A temperatura da base deve ter em conta o material a ser impresso. Com uma temperatura demasiado baixa, a cama não consegue combater as contrações térmicas e com uma temperatura muito elevada o material pode liquidificar, fazendo com que a peça deslize sobre a base.

Para este efeito, são sugeridas temperaturas entre os 20°C e 60°C para impressões de PLA e entre 90°C a 110°C para impressão de ABS [21].

Tratando-se de uma impressora delta, a área de impressão é circular, pelo que será selecionada uma base aquecida com a mesma forma. Consequentemente, selecionou-se uma base aquecida com 220mm de diâmetro (fig.76). Esta base consiste num disco de alumínio com uma resistência incorporada que, quando alimentada com uma tensão de 12V ou 24V, provoca o seu aquecimento. O diâmetro efetivo de impressão ronda os 200mm pois encontram-se vários furos de montagem na periferia do disco.

Deve ser acoplado a esta base um sensor de temperatura para permitir o controlo da mesma. É comum a utilização de termístores do tipo NTC de 100Kohm encapsulados em vidro. Estes componentes são pequenos, baratos e permitem a medição de temperaturas até os 250°C. Por se tratar de uma resistência variável, podem ser facilmente medidos por um conversor

analógico-digital e seu controlo feito através de um controlador PID. Este termístor será posicionado o mais próximo do centro de impressão, em contacto direto com a base aquecida, de modo a fornecer uma leitura de temperatura representativa de toda a base.

Isolar termicamente a base aquecida tem várias vantagens. Para além de oferecer alguma proteção ao utilizador, ajuda a conservar o calor gerado pela resistência elétrica. O isolamento ajuda a minimizar a condução de calor para os restantes componentes adjacentes tais como os parafusos de ajuste. Optou-se por usar uma camada de cortiça e um disco de madeira contraplacada que contactam com a base aquecida (fig. 76). Estes dois materiais apresentam uma baixa condutibilidade térmica e são recomendados para utilizações até os 120°C [97]. O termístor será montado entre o isolamento e a base aquecida, numa ranhura feita para esse fim. O disco de isolamento apresenta um furo no centro para permitir a passagem dos fios elétricos da resistência e do termístor.

Por fim, a base deve permitir um ajuste manual da sua inclinação de modo a mantê-la nivelada em relação ao plano de impressão. O nivelamento da base é um aspeto crítico para o processo de impressão. Este ajuste será feito, manualmente, através do aperto de quatro parafusos ligados à base com molas que ajudam a manter a base na posição desejada. Estes parafusos estão dispostos de forma a facilitar a afinação da inclinação em torno dos eixos cartesianos X e Y.

No topo da base aquecida, que é efetivamente a superfície de impressão, será colada uma película de poli-imida (PI) (fig. 76). Esta película garante uma boa aderência para a impressão de PLA e ABS, é resistente a altas temperaturas e é reutilizável [49].

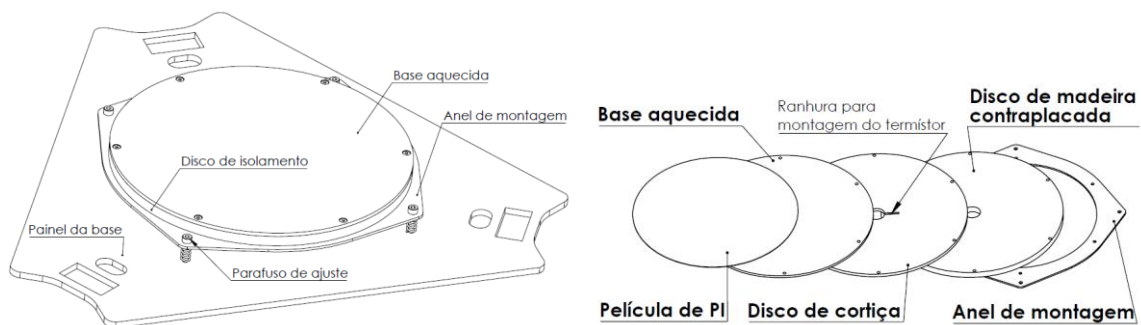


Figura 76 - Detalhe de montagem da base de impressão.

4.3 Eletrónica

O conjunto eletrónico é um dos elementos mais importantes em impressoras 3D. O componente mais importante para efetuar todas as operações de controlo é o microcontrolador, onde todos os outros componentes eletrónicos serão ligados.

Para o controlo selecionou-se um *Arduino Mega 2560* com uma placa *RAMPS 1.4* [102, 103]. Estes componentes são bastante baratos e de grande disponibilidade no mercado. Placas como a *RAMBo* ou *RUMBA* são baseados no mesmo microcontrolador, no entanto são relativamente mais caras. Tal como a placa *RAMPS*, a placa *RAMBo* é compatível com apenas cinco controladores para motores de passo. Apenas a placa *RUMBA* é compatível com seis controladores o que seria ideal para esta máquina, visto que terá três motores para a movimentação dos carris e três motores para a alimentação dos filamentos. O seu custo, que é cerca de seis vezes superior à solução escolhida não compensa em termos de desempenho. Para colmatar esta limitação é possível adicionar uma placa de extensão à placa *RAMPS*, em que é necessário fazer uma ligação direta aos pinos auxiliares que não têm nenhuma função atribuída.

O *Arduino Mega* é um microcontrolador de *8bits*, que para fazer o controlo básico de impressoras 3D é uma solução básica e bastante económica. Para o controlo de impressoras delta, em que é necessário que o microcontrolador faça diversas conversões geométricas antes de dar as instruções de movimentação aos seus motores, pode apresentar várias limitações. Entre elas, as velocidades máximas e acelerações que a máquina será capaz de atingir podem ser prejudicadas pelo tempo que o microcontrolador é capaz de fazer as operações matemáticas necessárias. Existem no mercado muitas impressoras delta que usam microcontroladores de *8bits*. No entanto, algumas das impressoras topo de gama usam já sistemas de controlo com uma arquitetura de *32bits* [60]. Através destes, é possível atingir velocidades bastante superiores devido ao seu elevado poder de cálculo.

Tendo em conta estes aspetos, a substituição do microcontrolador para uma placa mais potente, como por exemplo um *Arduino Due*, será uma solução se se verificar um funcionamento errático ou pouco preciso do sistema de movimentação da máquina.

A placa RAMPS 1.4 possui diversos pinos para a ligação de sensores de temperatura, ligação de ventoinhas e resistências de aquecimento, fins-de-curso e painel de controlo com ecrã, entre outros.

Controladores

A placa RAMPS 1.4 é compatível com controladores para os motores de passo do tipo Pololu [104]. Estes componentes têm pinos padronizados que facilitam a substituição por controladores com diferentes características. Tendo em conta as características dos motores de passo selecionados, escolheu-se os controladores Allegro A4988. Estes podem ser alimentados com tensões até os 35V, são capazes de fornecer até 2A e controlar até modos de *1/16 microstepping* [105]. Por serem suscetíveis de aquecer durante o seu funcionamento, deve ser montado um dissipador na superfície do circuito integrado e devem ser arrefecidos com uma ventoinha. Estes componentes são muito baratos, custando cerca de 0.80€ por unidade. Outros modelos de microcontroladores compatíveis são os controladores baseados nos circuitos integrados DRV8825 da *Texas Instruments* ou TMC2100 da *Trinamic*.

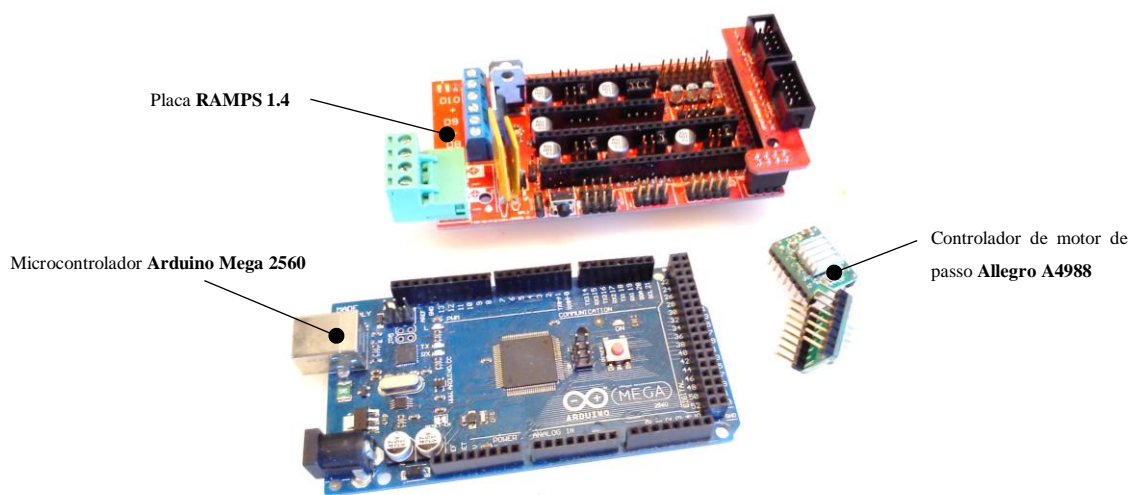


Figura 77 - Componentes eletrónicos seleccionados para o controlo da impressora.

4.3.1 Ligação dos componentes eletrônicos

A figura 78 apresenta um diagrama esquemático onde estão representados todos os componentes eletrônicos e as suas ligações. Mais à frente fez-se uma síntese do funcionamento, referenciando para cada componente algumas das suas características e a sua função específica no conjunto.

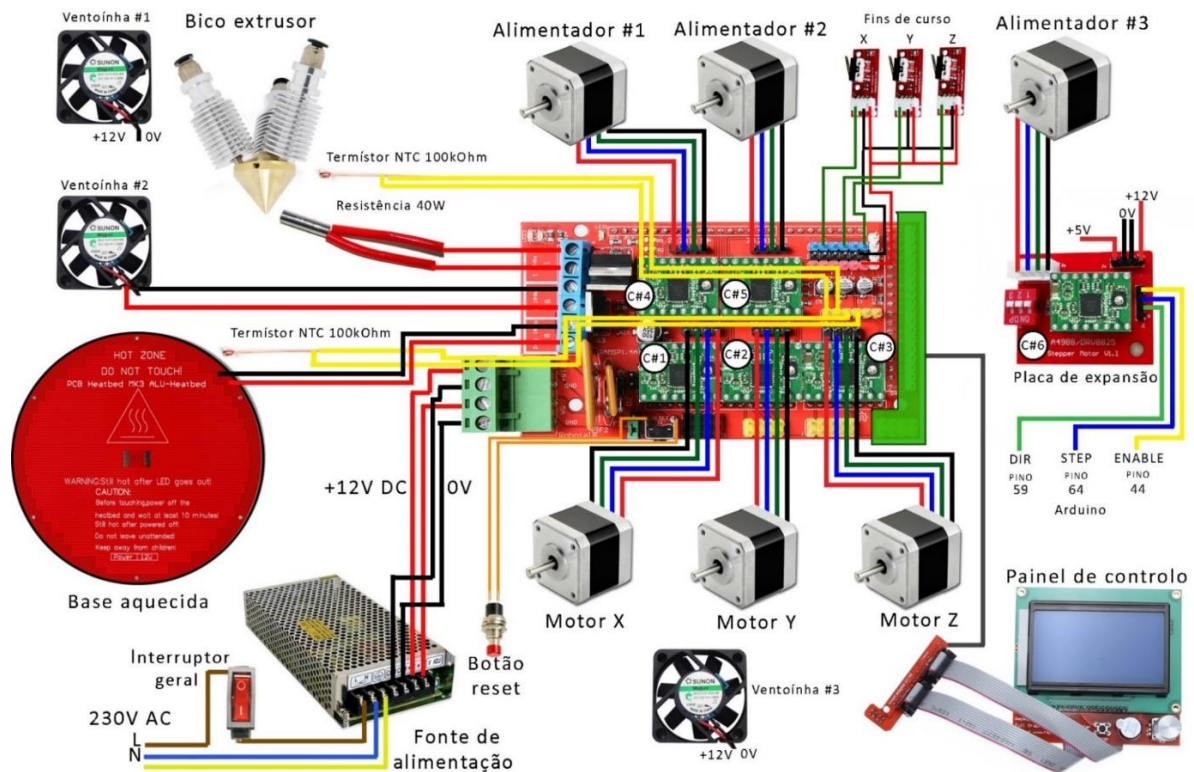


Figura 78 - Ligações dos componentes eletrônicos à placa RAMPS 1.4 com um microcontrolador Arduino Mega 2560.

4.3.1.1 Movimentação

O módulo de movimento é composto por três motores de passo bipolares denominados por X, Y e Z. Cada um destes motores é operado pelos controladores C#1, C#2 e C#3 respetivamente. Estes motores são responsáveis por fazer movimentar os respetivos carris, verticalmente, ao longo do comprimento das torres. No topo das torres encontram-se três fins-de-curso mecânicos que limitam o curso dos carris. Estes componentes serão responsáveis por fazer a referenciação da posição do efector em relação à superfície de impressão. Os controladores são alimentados por tensão contínua de 12V, proveniente da fonte de tensão e o seu controlo é feito digitalmente por sinais de baixa tensão (5V) proveniente do microcontrolador. Todos os controladores serão arrefecidos pela ventoinha #3 que estará sempre ligada.

4.3.1.2 Extrusão

O módulo de extrusão é composto por duas unidades: a unidade de alimentação de filamento e unidade de aquecimento.

A primeira é composta por três motores de passo, denominados alimentador #1, #2 e #3, controlados pelos controladores C#4, C#5 e C#6 respetivamente. Os controladores C#4, C#5 estão diretamente montados na placa RAMPS 1.4, enquanto o controlador C#6 está montado

num PCB de expansão, ligada aos pinos auxiliares. Esta ligação advém do facto de estarem disponíveis apenas cinco pontos de montagem para os controladores na placa principal. Todos os motores de passo para os alimentadores operam com uma configuração de *microstepping* 1/8.

A segunda unidade é composta pelos elementos de aquecimento e arrefecimento da peça e do extrusor. A resistência de aquecimento é responsável por provocar um aumento de temperatura no bico do extrusor. Está alimentada por 12V e é controlada através de um controlador PID programado no microcontrolador. O *feedback* de temperatura é feito pelo termistor e o controlo é feito por *pulse width modulation* (PWM). A ventoinha #1 está sempre ligada e ajuda a refrigeração dos três dissipadores de calor montados no bico extrusor. A função da ventoinha #2 é arrefecer o material extrudido e a sua velocidade pode ser controlada por PWM. Ambas as ventoinhas operam com 12V.

4.3.1.3 Base aquecida

O módulo da base é composto pela base aquecida e por um termistor NTC (*negative temperature coefficient*). De forma semelhante ao bico extrusor, o aquecimento é feito pela alimentação de 12V e o seu acionamento pode ser feito por PWM. O feedback de temperatura é feito pelo termistor e o controlo do conjunto é feito por PID.

4.3.1.4 Painel de Controlo

O painel de controlo consiste num conjunto de itens de visualização, seleção e comunicação de dados [106]. A navegação é feita através de um codificador rotativo relativo com botão incorporado. Através deste elemento é possível navegar e selecionar opções apresentadas no ecrã LCD. Este ecrã é monocromático de 3.2 polegadas com resolução de 128 por 64 pontos. Neste módulo está presente um sinalizador sonoro para oferecer algum *feedback* entre a máquina e o utilizador. Inclui também um botão de paragem e um *slot* para cartões de memória SD para impressão direta de ficheiros em código g. Nas proximidades do painel de controlo será montado um botão de *reset* que funcionará como um botão de emergência. Estará também disponível uma saída USB do tipo B para ligar a máquina a um computador. Através desta ligação é possível efetuar operações de controlo, monitorização e impressão.

4.3.1.5 Alimentação

Este módulo converte a corrente alternada de 220-230V em 12V corrente direta que por sua vez alimenta todos os restantes componentes eletrónicos através da unidade de controlo. A fonte de alimentação possui um sistema de controlo de temperatura independente e o seu arrefecimento é feito através de uma ventoinha incorporada. Inclui um interruptor de corte geral de energia com um fusível incorporado.

Na figura 79 são apresentadas as diferentes localizações destes componentes eletrónicos na máquina. Note-se que para os componentes montados no topo e no efector serão necessários cabos com um comprimento suficiente para serem ligados ao microcontrolador. Todos estes

cabos passarão dentro dos perfis das torres, que possuem um canal oco. Esta solução serve sobretudo para proteger os cabos e torna a máquina mais agradável esteticamente.

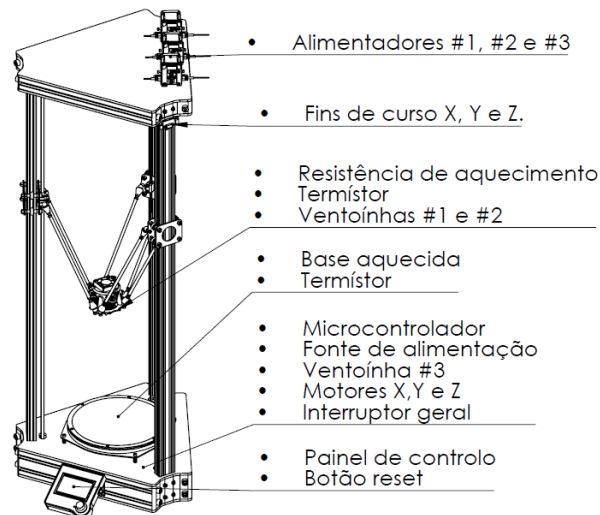


Figura 79 - Localização dos diferentes componentes eletrônicos na máquina.

4.3.2 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação é o componente eletrônico responsável por fornecer energia a todos os componentes eletrônicos. A sua seleção passa por compreender qual a potência mínima necessária, sabendo quais as potências de cada componente individual. Os componentes de aquecimento costumam precisar de uma potência relativamente elevada, o que leva a prever que as resistências de aquecimento do extrusor e da base serão, individualmente, os componentes que vão necessitar de mais corrente. Os motores de passo serão também um fator determinante na escolha da fonte de alimentação adequada.

Fez-se uma compilação das tensões e correntes de operação para todos os componentes eletrônicos que permitiu calcular a potência aproximada que a fonte de alimentação terá de ser capaz de fornecer (tabela 12). Embora o microcontrolador opere a 5V, este vem equipado com um regulador de tensão que permite a alimentação até tensões de 20V. Os motores de passo selecionados foram desenvolvidos para operar até os 2A. Este valor extremo foi usado para efeitos de dimensionamento. No circuito eletrônico estarão seis motores deste tipo: três para a movimentação e três para a alimentação dos diferentes filamentos. As resistências de aquecimento, do extrusor e da base, consomem cerca de 11A. As ventoinhas são menos exigentes do ponto de vista energético pois consumirão, no total, cerca de 1.5A.

Tabela 12 - Componentes eletrônicos e respetivas potências.

Componente(s)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
Microcontrolador	5	~1	5
Motores de passo	12	<12	144
Resistência do extrusor	12	~3.3	40
Base aquecida	12	~8	96
Ventoinhas de arrefecimento	12	~1.5	18
Total			303W

Sabendo que uma tensão de 12V será ideal para alimentar todos os componentes eletrónicos, esta será a tensão de referência na seleção da fonte de alimentação. A tensão de entrada será de 220V em corrente alternada que é o tipo de alimentação elétrica doméstica em Portugal.

As fontes de alimentação são componentes que tendem a aquecer quando estão em funcionamento. Hoje em dia, grande parte das fontes de alimentação possuem um sistema de controlo de temperatura incorporado. Tal como nos controladores dos motores de passo, a sua montagem na máquina deve ser feita de modo a que o ar possa circular livremente com o mínimo de obstruções que possa pôr em causa a eficácia das ventoinhas no seu arrefecimento.

Selecionou-se uma fonte de 12V com 360W de potência (fig. 80). Esta escolha, embora mais potente do que o necessário, poderá ser útil para alimentar periféricos da máquina no futuro tal como iluminação por LEDs ou sistemas de aquecimento para implementação de uma câmara de impressão aquecida.



Figura 80 - Fonte de alimentação de 12V com uma potência de 360W [107].

Tendo em conta as potências dos componentes eletrónicos, usou-se cabos elétricos com diferentes diâmetros de modo a evitar sobreaquecimento dos mesmos. Para a ligação de potência da base aquecida usou-se cabos elétricos de cobre da medida 20AWG. Para os restantes componentes usou-se cabos da medida 22AWG ou equivalente, também em cobre.

4.3.3 Fins-de-curso

Os fins-de-curso são os componentes responsáveis por dar o sinal ao microcontrolador de que os carris atingiram o a sua distância máxima de translação ao longo da torre. Para impressoras delta, e se não houver nenhum detetor no efetor capaz de determinar qual a altura relativa entre a base e o bico de extrusão, a altura do efetor é determinada a partir destes componentes. Em impressoras delta é essencial que os fins-de-curso sejam acionados exatamente à mesma altura já que é a forma de garantir que o bico extrusor se encontra geometricamente no centro da área de impressão.

A solução para fazer esta referenciação é colocar três fins-de-curso no topo das torres de modo a detetar a posição de cada carril. Estando a uma altura conhecida em relação à base de impressão, o sistema de controlo será capaz de saber qual a distância a percorrer até que seja atingida a base de impressão.

Selecionou-se fins-de-curso mecânicos devido ao seu baixo custo. Embora apresentem uma histerese mais elevada em relação a outros tipos de detetores de posição, este facto pode ser colmatado a partir de *software*. Para isso, muitos sistemas de controlo para impressoras 3D fazem a referenciação ativando duas vezes o fim-de-curso de modo a calcular a sua histerese e compensar a posição.

Estes componentes serão montados no topo das torres de modo a aproveitar ao máximo a altura de impressão oferecida pela máquina. A sua montagem será feita através de umas peças

em forma de L, ligadas aos perfis das torres através de um parafuso e uma porca “T”. Deste modo é possível a afinação da altura dos fins-de-curso, deslizando esta peça ao longo do perfil e bloqueando a sua posição ao apertar o parafuso.

A ativação é feita através do contacto com parte superior da chapa traseira do carril (fig. 81). Os fins-de-curso consistem num interruptor mecânico soldado a um PCB com um led que indica quando estes são ativados.

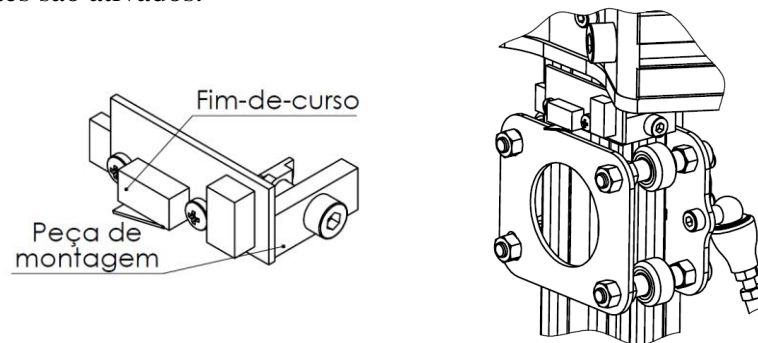


Figura 81 - Fim-de-curso e detalhe do seu acionamento ao contactar o carril.

4.3.4 Painel de controlo

O painel de controlo permite a comunicação entre o utilizador e a máquina. Este será localizado na parte frontal da máquina, que equivale ao lado formado pelas torres X e Y. Desenhou-se uma caixa que irá encapsular e proteger o painel (fig. 82). Consiste numa peça polimérica impressa por FDM e uma chapa frontal, em que estará acessível o botão de controlo. Possui um apêndice lateral que aloja um botão de *reset*. Este botão estará diretamente ligado ao microcontrolador e funcionará como um botão de emergência. Ao ativá-lo, todos os motores são desativados assim como as resistências de aquecimento. O seu posicionamento lateral facilita o alcance do utilizador, mas evita que seja ativado inadvertidamente quando o utilizador opera o painel.

O painel será montado com uma inclinação de aproximadamente 32° em relação à base da máquina. Esta inclinação minimiza o contraste do ecrã e fornece ao utilizador uma posição confortável de operação do painel de controlo.

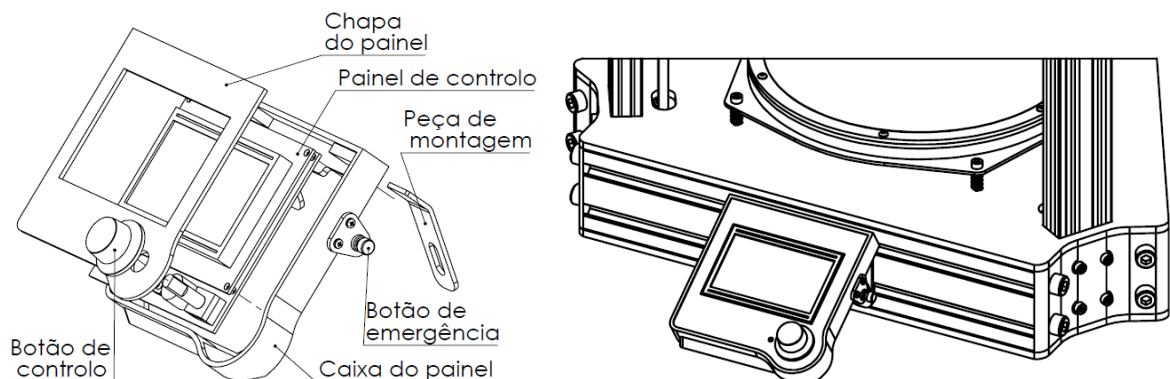


Figura 82 - Painel de controlo.

4.3.5 Configuração do firmware

O *firmware* refere-se ao programa instalado no microcontrolador que permite, para além de interpretar as instruções em código g, gerir e controlar todos os componentes periféricos tais como os motores de passo, sensores de temperatura, ventoinhas de arrefecimento, etc.

Para o controlo da máquina escolheu-se o *firmware Marlin*. As suas últimas versões são compatíveis com impressoras de configuração delta. Para além disso, este *firmware* pode ser usado com um grande número de microcontroladores. Este facto pode ser interessante para um possível melhoramento, no futuro, para um microcontrolador baseado num sistema de 32bits.

O *firmware Marlin* conta com um elevado número de funcionalidades úteis, tais como a edição de parâmetros de movimentação e de impressão, compatibilidade com diversos tipos de ecrãs e impressão direta de ficheiros em código g a partir de um cartão SD. Através de uma interface USB é também possível o seu controlo e monitoramento com um computador equipado com um *software* para esse efeito.

A configuração, e posterior gravação do *firmware* no microcontrolador, é feita através do IDE do *Arduino* (fig. 83). Este *firmware* possui diversos exemplos para impressoras delta, o que facilita bastante a adaptação do mesmo para uma impressora personalizada. Foram seguidos os passos de configuração disponibilizados na página *web* oficial deste *firmware* que são apresentados de uma forma sucinta [108].

A versão do *Marlin* usada foi a 1.1.0.-RC7.

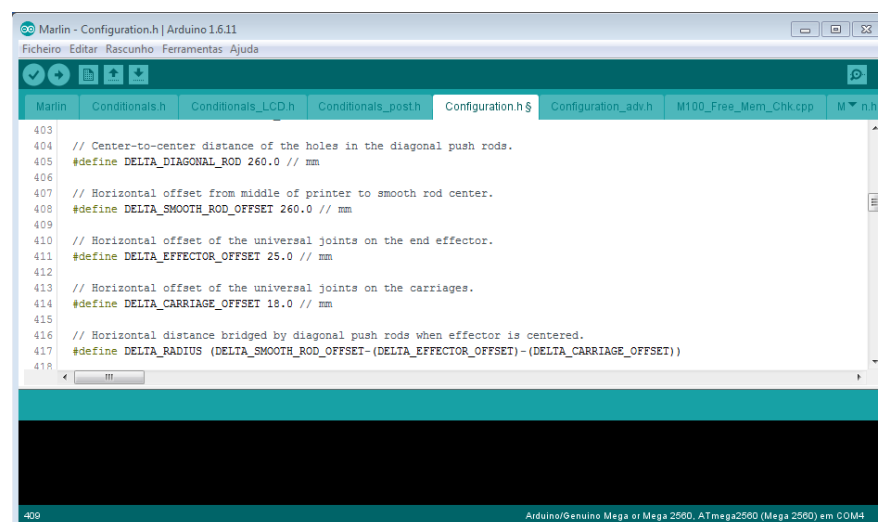


Figura 83 - Edição do *firmware Marlin* a partir do IDE do *Arduino*.

Os principais parâmetros a configurar no *firmware* estão relacionados com os componentes eletrónicos usados e características da máquina, entre eles:

- Tipo e versão do microcontrolador e placa auxiliar;
- Tipo de cinemática e dimensões da máquina;
- Tipo de interface de controlo e visualização;
- Sistema de transmissão e parâmetros de movimento;
- Sistema de alimentação de filamento;
- Dispositivos de medição de temperatura e parâmetros dos controladores PID.

A tela principal (fig. 84) apresenta várias informações úteis sobre o estado e funcionamento da impressora. Através do codificador angular, presente no painel de controlo, é possível aceder e navegar em diferentes menus que apresentam todas as outras

funcionalidades deste *firmware*. O *feedback* sonoro auxilia a navegação pois permite confirmar as seleções do utilizador.



Figura 84 - Tela principal do sistema de controlo da impressora (*firmware* Marlin).

No Anexo E estão apresentados os principais comandos usados e respetivos valores. Para alguns destes parâmetros tomou-se os valores de defeito fornecidos pelo próprio *firmware*. Entre estes estão os limites de aceleração para a alimentação de filamento assim como os parâmetros PID do extrusor e da base aquecida. Estes poderão ser alvo de alterações no futuro durante a calibração ou após utilização extensiva da máquina.

4.4 Fabrico

Tendo em conta que alguns dos componentes foram desenvolvidos no âmbito deste projeto, houve a necessidade de os fabricar usando equipamentos e materiais disponibilizados pelo LDPS e pelo INEGI.

Os materiais e processos de fabrico para cada componente foram definidos já na fase de desenvolvimento e foram determinantes para o aspeto final dos mesmos.

De seguida serão apresentados os processos de fabrico utilizados para algumas das peças da impressora, referindo os equipamentos, métodos e materiais para cada um deles. Entre os principais processos usados podem ser salientados a impressão por FDM, punção de chapa, torneamento e maquinagem. Limagem, lixagem e outros processos abrasivos foram usados para o acabamento destas peças.

4.4.1 Impressão de peças por FDM

Alguns dos componentes foram desenhados para serem impressos por FDM. Durante a fase de desenho teve-se em conta o seu processo de fabrico de forma a proporcionarem uma impressão simples. Evitou-se, por isso, a introdução de geometrias que doutra forma necessitassem de suporte para serem impressas com sucesso.

Os desenhos virtuais destas peças foram convertidos para o formato STL. Para fazer a preparação para impressão usou-se o *software* livre Cura (fig. 85). A partir deste programa foram geridos os comandos em código g, que possuem as instruções de impressão das peças, e corridos na máquina. A impressão foi feita a partir do computador, ligado por USB à respetiva máquina, com o auxílio do *software* livre Repetier.

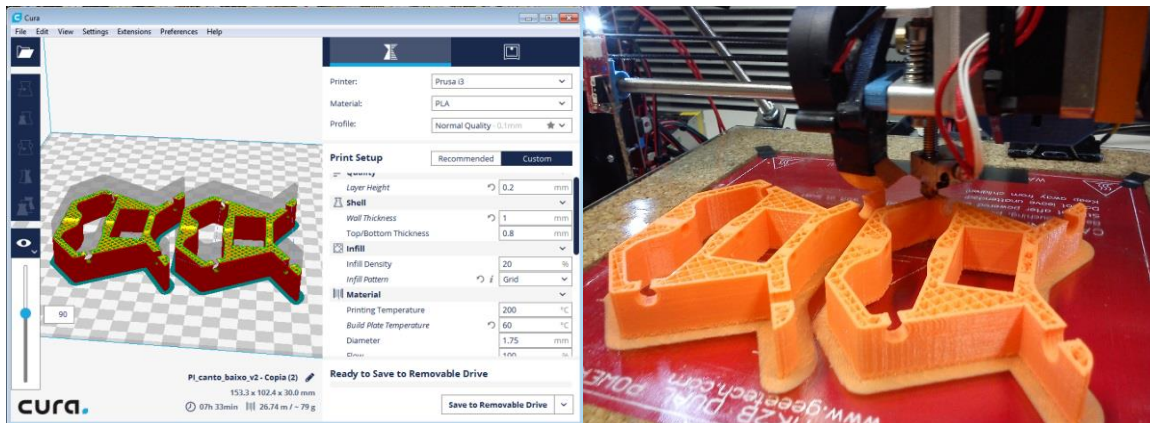


Figura 85 - Geração do código de impressão através do *software* Cura e impressão por FDM dos cantos superiores do chassi.

A máquina usada foi uma impressora FDM do estilo PrusaI3 (fig. 86), cartesiana, com uma área de impressão de 300x300mm. A base de impressão, que é aquecida, foi preparada com uma película fina de cola líquida para facilitar a adesão do material à mesma. O sistema de extrusão desta máquina está otimizado para a impressão de PLA e possui um bico de extrusão com 0,3mm de diâmetro.

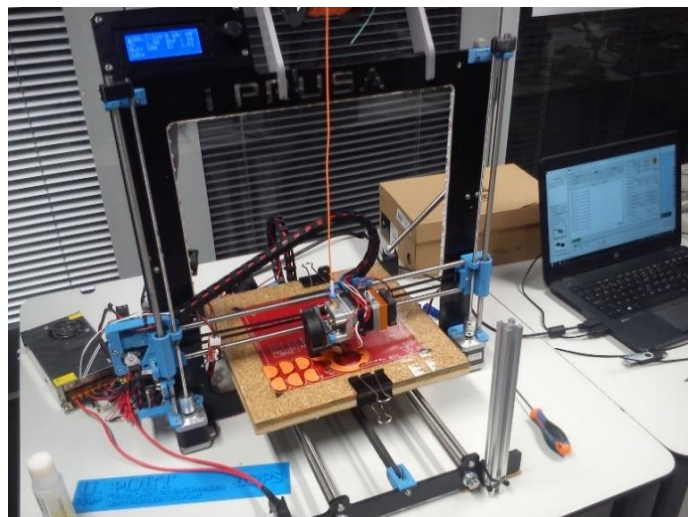


Figura 86 - Impressora FDM Prusa I3 usada para a impressão dos componentes em PLA.

Tendo em conta a área de impressão deste aparelho foi necessário fazer vários ciclos de impressão de modo a imprimir todos os componentes necessários.

Entre os principais parâmetros de impressão podem ser destacados:

- Altura de camada: 0,2mm
- Enchimento: 20%
- Espessura de parede: 1,2mm
- Velocidade de impressão: 60mm/s

Antes de proceder à impressão final das peças foram feitas peças-teste para averiguar a fiabilidade da impressão. Concluiu-se que havia um erro de, aproximadamente 0.2mm em todos os eixos. Os furos que se encontravam perpendiculares à base de impressão apresentaram menos 0.5mm em relação ao diâmetro definido no desenho e uma forma ovalizada (fig. 84). Tendo isto em conta, foram feitas as modificações necessárias para aproximar as dimensões da peça

física às do modelo virtual, aplicando uma escala correspondente ao modelo e usou-se uma broca de diâmetro adequado para corrigir a forma dos furos. Este defeito poderá estar relacionado com possíveis folgas num dos eixos de translação da máquina ou com o próprio *software* de CAM.



Figura 87 - Defeito de impressão nas peças impressas: furo com forma oval.

Todas as peças impressas por este processo estão apresentadas no anexo B mostrando os respetivos parâmetros de impressão, materiais, tempos de impressão e custos de material. As pontas dos braços, feitas em ABS, foram fabricadas numa máquina *3DSystems Cube*. No entanto, o custo do material para esta impressora é cerca de cinco vezes mais caro quando comparado com a alternativa escolhida. Posto isto, as restantes peças foram todas impressas em PLA na impressora Prusa I3.

No total, foram necessárias 35h de impressão, tendo-se usado cerca de 370g de PLA e apenas 12g de ABS. O custo aproximado de todo o material foi de 8,30€.

4.4.2 Puncionamento de peças em chapa de alumínio

O puncionamento de chapas permitiu o fabrico de várias peças com uma boa precisão dimensional e com uma elevada resistência mecânica. Recorrendo à utilização de uma puncionadora CNC, a preparação por CAM para estas peças é relativamente rápida a partir dos desenhos em formato .dxf.

Entre as peças produzidas por este processo estão as chapas que compõem os carris, a chapa do efetor, o anel de montagem da base de impressão, as chapas de montagem dos motores de alimentação de filamento e a chapa do painel de controlo. Para estas peças usou-se chapa em liga de alumínio AISI 1100 com 2mm de espessura, à exceção dos suportes da unidade de alimentação em que a espessura da chapa foi de 3mm.

A máquina usada foi uma puncionadora mecânica *Wiedemann Magnum 2125* com controlo CNC *Muratec* presente no INEGI (fig. 88). No anexo D estão apresentadas as peças fabricadas por este processo, indicando o respetivo número de peças produzidas.



Figura 88 - Puncionadora CNC usada para o fabrico de peças em chapa: Wiedemann Magnum 2125 equipada com um sistema de controlo CNC Muratec.

Após o processo de puncionamento as peças foram sujeitas a vários acabamentos. O principal objetivo destes acabamentos foi facilitar o manuseamento destas peças durante a montagem e melhorar o seu aspeto visual. Começou-se por remover as rebarbas presentes na periferia da chapa por limagem manual. Estas rebarbas são originadas não só pelo processo de conformação plástica, mas também pelo facto de que esta máquina, tendo um número limitado de ferramentas de corte, seleciona aquela que mais se aproxima à geometria da peça. Por consequência, algumas das arestas circulares com raios elevados ficam com uma aparência serrilhada (fig.86). Por fim, limpou-se as peças e fez-se um acabamento com jato de areia. Atendendo a que as peças são feitas de alumínio, como material abrasivo utilizou-se microesferas de vidro com um diâmetro aproximado de 0,1mm, e operou-se o jato de areia com uma pressão baixa para evitar uma abrasão agressiva. Este processo permitiu esconder riscos e outros defeitos superficiais originados pelos processos anteriores (fig. 89).

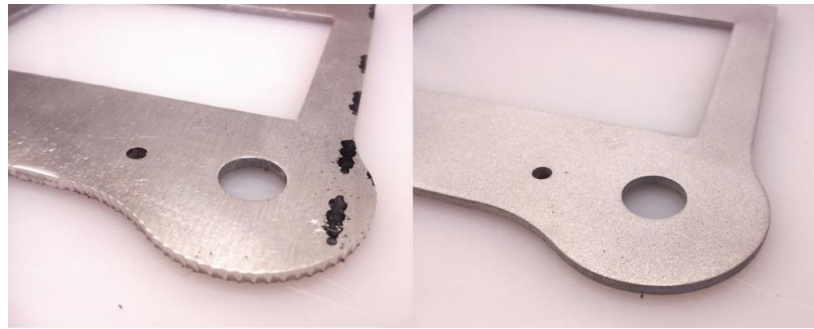


Figura 89 - Chapa do painel de controlo antes e depois dos acabamentos.

4.4.3 Torneamento dos espaçadores cilíndricos

Para o fabrico dos espaçadores cilíndricos presentes nos carris e no sistema de transmissão recorreu-se a um torno mecânico. Estes componentes estão presentes na montagem dos carris. A escolha deste processo está associada com a necessidade destas peças terem dimensões precisas e consistentes, o que seria complicado assegurar através de outros métodos de fabrico. Estes espaçadores têm uma grande influência na geometria da máquina já que vão definir o seu diâmetro efetivo. O torno, equipado com um codificador digital de distância, tornou a tarefa de corte para várias peças iguais mais prática (fig. 90)

Os espaçadores cilíndricos foram feitos a partir de tubos em liga de alumínio com diâmetros exteriores de 6 e de 8mm, sangrados com o comprimento desejado com uma ferramenta adequada. De seguida foram removidas as rebarbas em ambas as extremidades, resultantes do processo de corte.



Figura 90 - Torneamento dos espaçadores cilíndricos.

4.4.4 Maquinagem dos painéis do chassis

Os processos de maquinagem foram usados exclusivamente para o fabrico dos painéis do chassis. Usou-se uma fresa de aço rápido com 3mm de diâmetro. O código g foi preparado a partir dos ficheiros virtuais com o *software Mastercam*. Ao todo foram produzidos quatro painéis com contornos semelhantes, mas com diferentes furos no seu interior. Dependendo da sua posição no chassis, estes painéis foram preparados com diferentes furos para permitir a sua montagem, a passagem dos cabos elétricos, das correias de transmissão e dos perfis das torres (fig. 91).

Os painéis foram feitos a partir de placas de polietileno com 5mm de espessura. As velocidades de corte e de avanço foram selecionadas de modo a evitar a fusão do material durante a operação de corte. Tendo em conta que se trata de um material polimérico, a sua fusão e aderência à ferramenta de corte acabariam por pôr em causa o acabamento da peça.

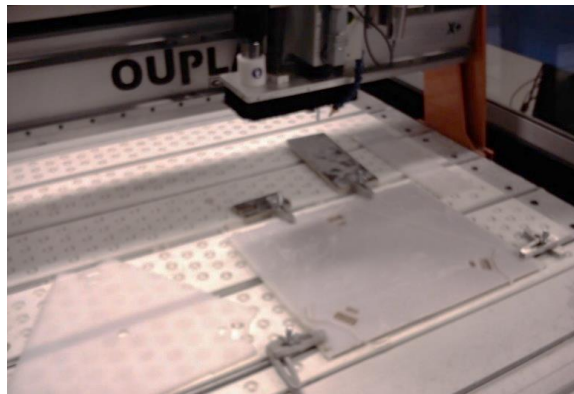


Figura 91 - Corte dos painéis do chassis, em polietileno, por maquinagem CNC.

4.4.5 Outras operações

Outras operações realizadas para o fabrico dos restantes componentes envolveram o corte dos perfis laterais do chassis e dos tubos dos braços, assim como a furação manual dos painéis do chassis para permitir a sua montagem com parafusos.

Na montagem dos componentes eletrónicos foram soldados vários conectores para auxiliar a sua desmontagem em operações de manutenção ou modificação dos mesmos no futuro. Devido ao comprimento dos cabos elétricos para os componentes eletrónicos montados no topo da impressora, houve a necessidade de fazer vários aumentos dos cabos. Estes foram feitos soldando as pontas dos cabos e protegendo a ligação com mangas termoretráteis (fig. 92).

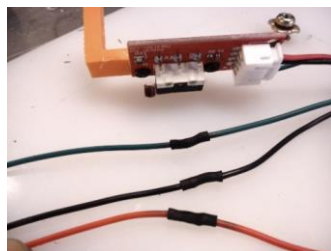


Figura 92 - Soldagem e proteção da junta com mangas termoretráteis, dos cabos dos fins-de-curso.

4.5 Montagem, calibração e teste

De seguida serão apresentados os detalhes de montagem da máquina, da calibração do sistema de extrusão, aquecimento e movimentação. Por fim imprimiu-se várias peças com a finalidade de analisar a qualidade das mesmas.

4.5.1 Montagem

A construção do protótipo físico passou por uma série de montagens elementares que foram posteriormente ligadas seguindo uma sequência. Para além de facilitar a montagem total do protótipo, este método permitiu assegurar, ao longo da sequência, as ligações e os posicionamentos corretos dos componentes.

Na base do chassis foram montados os componentes eletrónicos, nomeadamente o microcontrolador e a fonte de alimentação e os motores de passo do sistema de movimentação nos devidos lugares (fig. 93). Foi necessário o fabrico de umas pequenas peças que permitiram a montagem destes componentes sobre o painel 1 do chassis. Teve-se o cuidado de usar cabos elétricos com proteção eletromagnética para as ligações dos componentes de transmissão de dados, nomeadamente os cabos para o painel de controlo e o cabo de ligação USB. Deste modo minimizou-se possíveis interferências provocadas pelos motores e cabos elétricos de alta corrente montados nas proximidades.

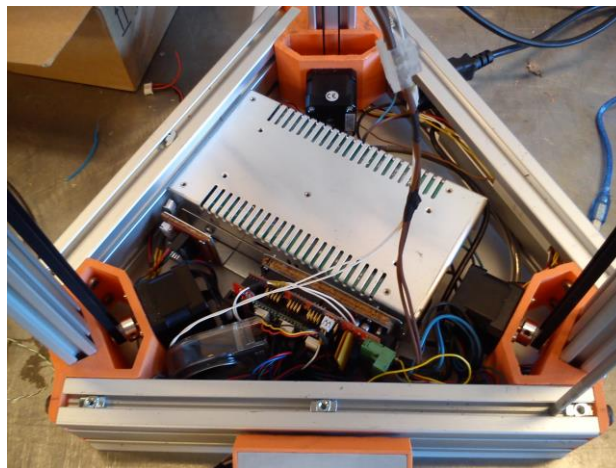


Figura 93 – Montagem dos componentes eletrónicos na base do chassis.

Os cabos elétricos para os restantes componentes, que serão montados no topo e no efetor, passarão dentro dos perfis das torres. Posto isto organizou-se estes cabos da seguinte forma:

- Torre X – Passagem dos cabos para os fins-de-curso;
- Torre Y – Passagem dos cabos para os motores dos alimentadores;
- Torre Z – Passagem dos cabos para os componentes montados no efetor.

Os ímanes foram montados nas junções dos braços com um adesivo cianoacrilato (fig. 94 a). Desta forma evitar-se-á o seu desacoplamento durante o funcionamento da máquina. Fez-se uns furos na parte lateral da máquina e usou-se uma chapa de modo a permitir a montagem das conexões para a alimentação elétrica e conexão de dados USB (fig. 94 b).



Figura 94 - Colagem dos ímanes às junções dos braços e montagem do painel de conexões elétricas e USB.

4.5.1.1 Sequência de montagem

A montagem da máquina foi feita a partir de um conjunto de montagens elementares (fig. 95). As massas das montagens do extrusor no efetor, dos braços e dos carris estiveram muito próximas das massas previstas no capítulo 4.2.4, em que se calculou as solicitações mecânicas.

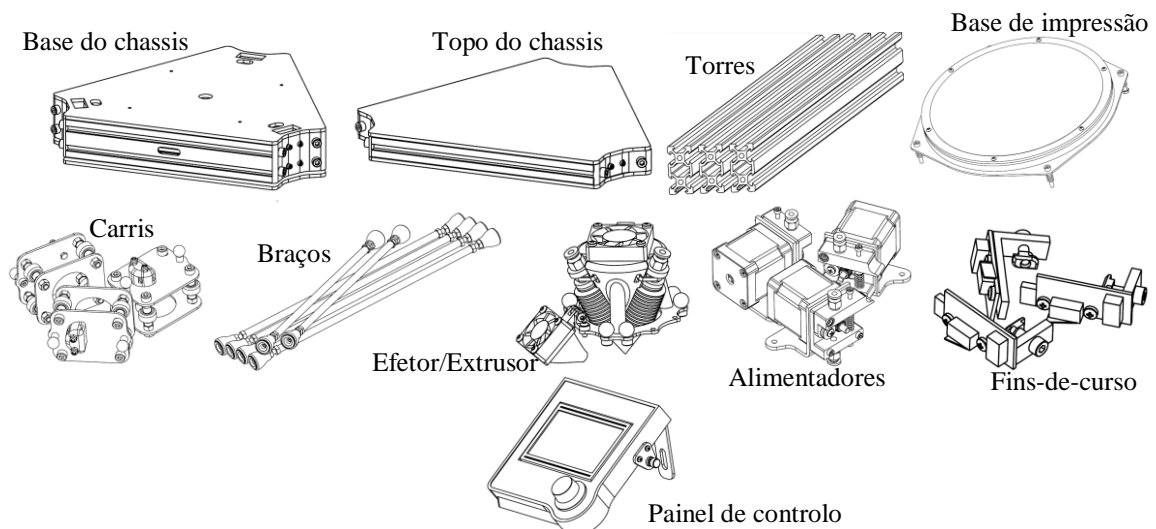


Figura 95 - Montagens elementares feitas antes de passar à montagem final da impressora.

Para a montagem da impressora foi seguida a seguinte sequência:

- Montagem das torres na base do chassis passando os cabos no centro dos perfis;
- Montagem dos carris nas torres;
- Montagem do topo do chassis nas extremidades das torres e montagem do sistema de transmissão;
- Montagem da base de impressão na base do chassis;
- Montagem dos braços aos carris e ao efetor;
- Montagem dos alimentadores no topo do chassis;
- Montagem dos fins-de-curso no topo das torres;
- Montagem do painel de controlo na parte frontal da máquina.

Após a montagem inspecionou-se as ligações elétricas e testou-se a máquina para assegurar o seu funcionamento correto, tanto da parte móvel como do sistema de controlo. De seguida são apresentadas algumas fotografias do protótipo físico mostrando alguns detalhes (fig. 96 e fig. 97).

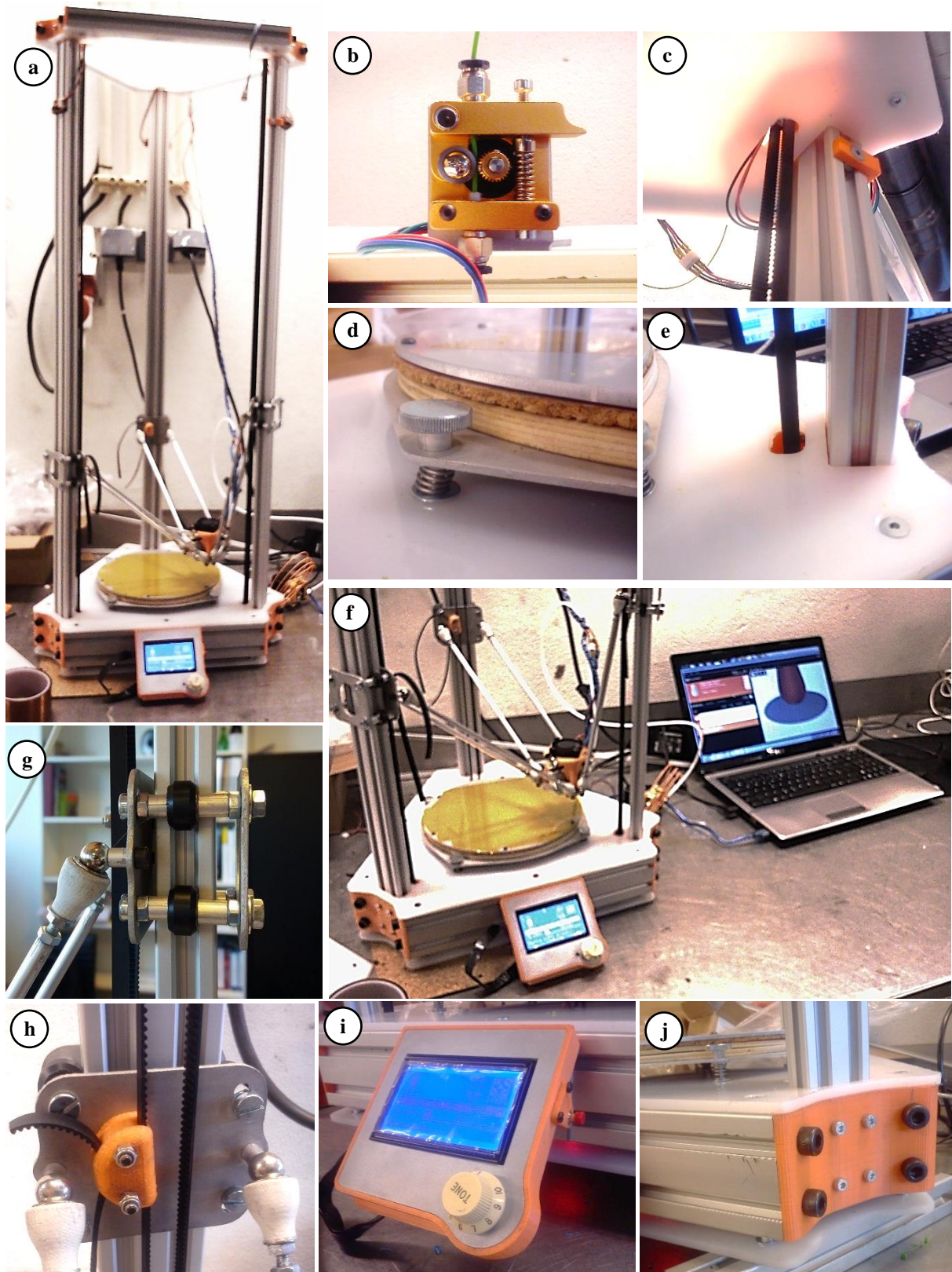


Figura 96 - Detalhes da impressora: a) impressora, b) alimentador de filamento, c) correia e topo do chassis, d) parafuso de ajuste da base de impressão, e) passagem da correia pelo painel da base do chassis, f) ligação da máquina a um programa de controlo por USB, g) rolamentos do carril, h) fixação da correia no carril, i) painel de controlo, e j) canto inferior do chassis.

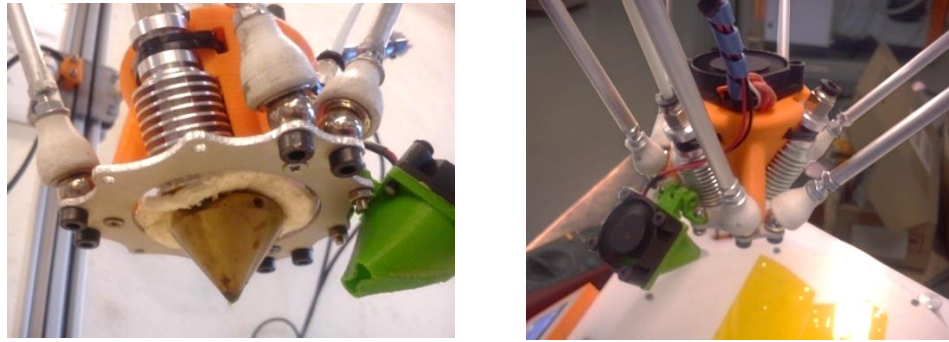


Figura 97 - Montagem do extrusor no efetor.

4.5.2 Calibração

Após a montagem e verificação de todas ligações dos componentes eletrônicos, procedeu-se à calibração da máquina. Esta calibração foi feita seguindo uma sequência de quatro passos. Em primeiro lugar, afinou-se a corrente fornecida aos motores de passo através dos controladores. De seguida foi verificado o sistema de alimentação de filamento. Em terceiro lugar analisou-se a temperatura e funcionamento do bico extrusor e da base aquecida. Por fim, calibrou-se o sistema de movimentação. Os componentes eletrônicos montados na base são facilmente acedidos desmontando o painel do chassis que contém a base de impressão.

Embora houvesse a possibilidade de editar e calibrar a maior parte dos parâmetros através do painel de controlo da máquina, foram usados *softwares* de controlo a partir de um computador por serem mais práticos e apresentarem uma melhor interface gráfica. Os programas usados foram o *Repetier-Host* e o *Pronterface*, ambos *softwares* livres.

4.5.2.1 Calibração dos controladores dos motores de passo

Para os controladores dos motores de passo, baseados no circuito integrado *Allegro A4988*, a corrente que estes fornecem ao motor pode ser afinada através de um potenciômetro. Esta corrente é proporcional a uma tensão medida entre dois pontos acessíveis no PCB do controlador (fig. 98). Especificamente para estes controladores, há uma relação de 2,5A/V entre a corrente máxima de funcionamento e a tensão medida. A medição é feita entre o corpo do potenciômetro e o pino GND (0V). Mediu-se esta tensão com um multímetro enquanto os motores estão ativos, mas não em movimento (tabela 13).

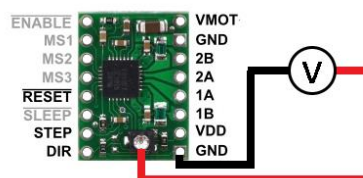


Figura 98 - Medição da tensão no controlador Allegro A4988.

A combinação dos pinos MS1, MS2 e MS3 estabelece o modo de funcionamento de *microstepping*. Para um funcionamento em 1/16 *microstepping*, todos estes pinos deverão estar ligados enquanto para um funcionamento em 1/8, apenas o pino MS3 deve estar desativado. A ativação destes pinos é feita através de *jumpers* na placa RAMPS.

Tabela 13 - Parâmetros dos controladores dos motores de passo.

Controladores	Configuração de <i>microstepping</i>	Tensão medida (V)	Corrente máxima (A)
Movimentação (X,Y,Z)	1/16	0,58	1,45
Alimentação de filamento	1/8	0,62	1,55

4.5.2.2 Calibração do sistema de alimentação

A calibração dos sistemas de alimentação passa por verificar se o comprimento de filamento extrudido está configurado corretamente. Para isso, basta mandar um comando através do *software* com a instrução de extrusão de um determinado comprimento de filamento e verificar, medindo esse comprimento, se é consistente com o comando enviado. Para afinar este parâmetro será editado o parâmetro dos passos por milímetro do respectivo motor do alimentador (fig. 99)



Figura 99 - Método seguido para a calibração do alimentador de filamento.

4.5.2.3 Calibração dos sistemas de aquecimento do extrusor e base

De seguida, verificou-se os sistemas de aquecimento da base e do extrusor. Este processo passou por medir as temperaturas no bico do extrusor e na superfície da base através de termómetro com a finalidade de verificar a consistência com os valores de temperatura medidos pelos termístores instalados nestes componentes. Foram feitos vários ciclos de aquecimento de modo a tentar detetar algum tipo de instabilidade provocado pelo controlo PID.

Mediu-se também a temperatura na base dos dissipadores de calor do extrusor e na peça polimérica de montagem deste à chapa do efetor. Esta medição permitiu constatar a eficácia da ventoinha de arrefecimento e do isolamento de lã de vidro montado entre o bico extrusor e os dissipadores de calor.

Foi possível concluir que os erros detetados em relação às temperaturas medidas pelos termístores foram na ordem dos 4°C. Para uma temperatura de 200°C no extrusor, a parte inferior dos dissipadores de calor apresentaram uma temperatura de 64°C. A superfície da peça de montagem do extrusor, mais próxima do bico, apresentou uma temperatura de 36°C (fig. 100). Considerou-se estas temperaturas aceitáveis, no entanto se ocorrer entupimentos de filamento, no futuro será analisada a possibilidade de adicionar uma



Figura 100 - Medição da temperatura na peça de montagem do extrusor, quando este está a uma temperatura de 200°C

ventoinha mais potente. No mesmo sentido, se for observado algum defeito nesta peça provocado pelo calor, deverá ser considerado um melhor tipo de isolamento.

A partir de uma temperatura ambiente de 15°C, a base demorou cerca de 3 minutos a atingir a temperatura de 55°C enquanto o extrusor demorou cerca de 7 minutos até estabilizar numa temperatura de 200°C (fig. 101). Com os parâmetros PID estabelecidos por defeito no *firmware*, verificou-se um *overshoot* de cerca 0,5°C para a base e de 2°C para o extrusor. Estes valores não são significativos pois o ciclo de impressão só começa no momento que as estas temperaturas estabilizam completamente, não influenciando o processo de impressão.

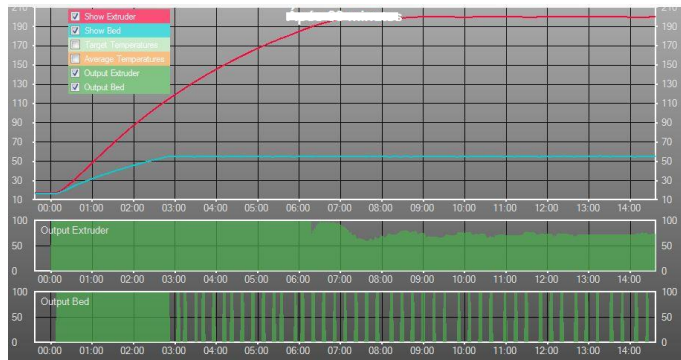


Figura 101 - Ciclo de aquecimento do extrusor (vermelho) e da base aquecida (azul) a partir de uma temperatura ambiente de 15°C (Criado com o programa *Repetier-Host*).

4.5.2.4 Calibração do sistema de movimentação

A calibração do sistema de movimentação é um dos processos mais importantes para este tipo de máquinas. Esta calibração é indispensável para a obtenção de modelos impressos com o mínimo de distorções da sua forma e uma boa fiabilidade dimensional.

Visto que esta máquina terá como único ponto de referência os fins-de-curso presentes no topo das torres, a calibração será feita manualmente. Para tal, é necessário que estes três fins-de-curso sejam ativados à mesma altura relativamente à base de impressão. Este facto assumirá que o bico extrusor se encontrará exatamente no centro da base de impressão.

Garantir, por via mecânica, que os três fins-de-curso são ativados exatamente à mesma altura é uma tarefa bastante complicada devido à histerese que estes componentes apresentam. Em alternativa, estes podem ser afinados por *software*, que consiste em atribuir uma determinada compensação a cada um dos fins-de-curso no momento da sua ativação. Este método faz com que seja contabilizada a histerese de cada um dos fins-de-curso mecânicos que pode ser apresentar diferenças entre eles.

As distorções do plano de impressão podem também estar associadas ao facto das dimensões dos braços e do diâmetro da máquina atribuídas no *software* serem diferentes das reais. Este facto faz com que o plano de impressão apresente formas côncavas ou convexas, dependendo do erro [85].

Para fazer esta calibração será seguido um método iterativo que passa por fazer alterações nas compensações de cada um dos fins-de-curso e nas dimensões da máquina. Serão estabelecidos quatro pontos de referência importantes para esta calibração: um ponto no centro da base de impressão e os restantes três pontos referem-se às zonas da periferia do diâmetro de impressão, mais próximas de cada uma das torres (fig. 102). A análise destes pontos permitirá apurar quais os erros aproximados para cada um dos fins-de-curso, pois maximizam esse valor.

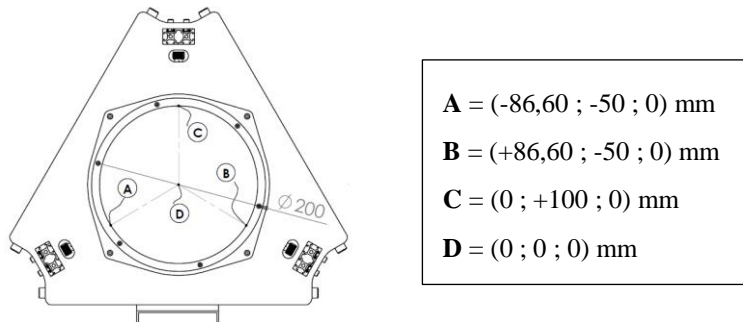


Figura 102 - Pontos de interesse para efetuar a calibração da máquina.

Em primeiro lugar, começou-se por efetuar várias medições e verificações com a finalidade de assegurar a geometria correta da máquina. Constatou-se a perpendicularidade das torres (fig. 103 a), o nivelamento da base de impressão (fig. 103 b) e afinou-se do comprimento dos braços (fig. 103 c). Posteriormente, pôs-se todos os fins-de-curso à mesma altura usando uma régua. Este método não garante que os fins-de-curso serão ativados simultaneamente, mas ajudará na calibração. Estes foram colocados a cerca de 96cm, desde a base da máquina (fig. 103 c).

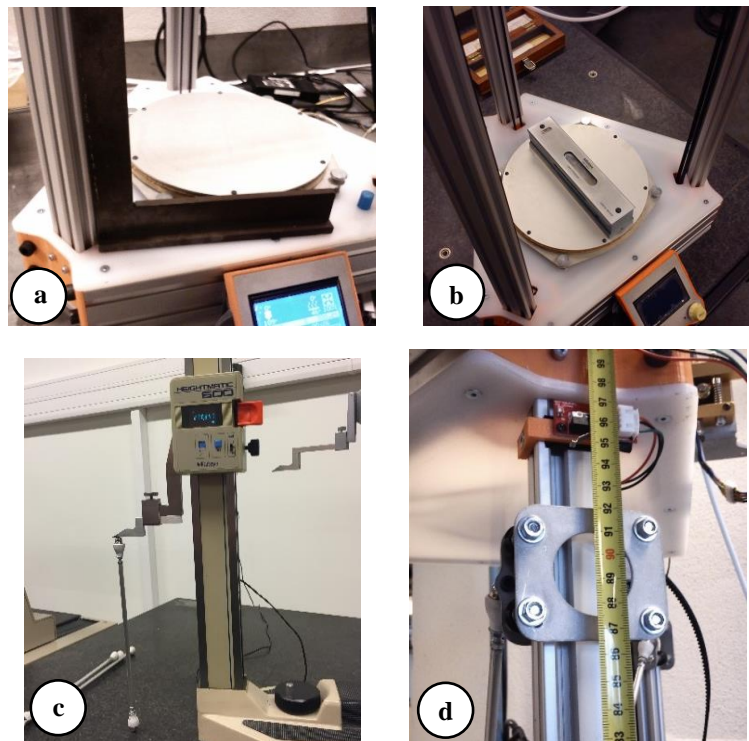


Figura 103 - Verificações e afinações feitas antes de calibrar a máquina: a) perpendicularidade das torres; b) nivelamento da base de impressão; c) Afinação do comprimento dos braços; d) ajuste da altura dos fins-de-curso.

Para este processo de calibração usou-se o *software Pronterface* por ter a possibilidade de adicionar *scripts*, úteis para a definição dos pontos A, B, C e D. Durante a sequência de calibração foram usados os seguintes comandos em código G:

- **G28**: Deslocação para o zero-máquina (ponto de coordenadas (0,0,545));
- **G90**: Movimentação em coordenadas absolutas;
- **M114**: Verificação da posição da máquina;
- **M665**: Alteração do comprimento dos braços e raio da máquina;

- **M666:** Compensação para cada um dos fins-de-curso;
- **M500:** Gravação das alterações na memória da máquina.

A calibração consiste em aproximar o extrusor da base de impressão, ficando a cerca de 5mm desta e ir baixando o extrusor em incrementos de 0,1mm. Para verificar a aproximação, usou-se uma folha de papel, com 0,1mm de espessura, que fica entre o bico extrusor e a mesa (fig. 104). Baixou-se lentamente o extrusor até que este contacte o papel e ofereça alguma resistência à translação do papel. Nesta situação, sabe-se que o bico extrusor está 0,1mm acima do plano de impressão.

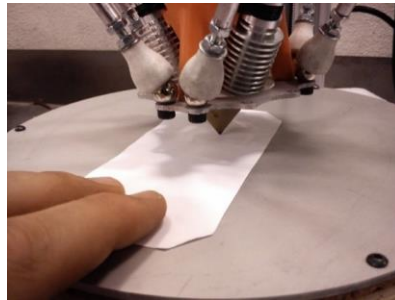


Figura 104 - Aproximação do extrusor à base de impressão utilizando um papel como verificação.

Para calibrar começou-se por ir para o zero-máquina, usando o comando G28. Depois mandou-se o extrusor para o ponto A, ficando a 5mm da base de impressão. Note-se que este ponto é na verdade o ponto com coordenadas (-86,60 ; -50 ; 0), onde será possível compensar esta altura através do comando M666. Baixou-se o extrusor até este contactar o papel e usou-se o comando M114 para verificar a posição do extrusor. Se, por exemplo, a altura devolvida for de Z-5,12mm, este será o valor a compensar no fim-de-curso X. Usando o comando de compensação este ficará da forma M666 X-5.12. Após cada alteração, o comando M500 foi usado para gravar as alterações e voltou-se a enviar o comando G28. Este processo deve ser repetido 2-3x, gravando sempre e indo para o zero-máquina entre as tentativas. Procedeu-se de forma semelhante para os pontos B e C, que correspondem a alterações nas compensações dos fins-de-curso Y e Z respetivamente. Estas alterações podem ser feitas de forma intercalada como por exemplo, verificar o erro para o ponto B e voltar a analisar o ponto A antes de passar ao ponto C. O objetivo final será que para cada um destes pontos, na coordenada 0 em Z, o papel ofereça uma resistência semelhante, o que indica que se encontram no mesmo plano de impressão.

De seguida passou-se à análise do ponto central. Mandou-se o extrusor para a posição (0 ; 0; 10) e baixou-se lentamente até este contactar o papel. Considerando que a base de impressão é perfeitamente plana e está nivelada, se este ponto apresentar um erro positivo, significa que a superfície de impressão calculada apresenta uma forma convexa. Inversamente, se o erro for negativo, a superfície de impressão calculada pela máquina é côncava [85]. Este erro pode ser colmatado alterando o valor do raio efetivo da máquina usando o comando M665. Este tipo de erro pode também estar associado ao comprimento inconsistente dos braços. No entanto, ao afinar previamente o seu comprimento foi possível medir exatamente o seu valor, pelo que esta variável não deverá ser alterada durante esta calibração. Para uma superfície resultante convexa, o raio da máquina deverá ser aumentado, e diminuído no caso de ser côncava [49]. Estes incrementos devem ser pequenos, na ordem dos 0,5mm. O comando para esta correção fica da forma M665 L260.30 R131.50, onde L corresponde ao comprimento dos braços e R ao raio da máquina. Depois de algum tipo de alteração com este comando, todo o processo de calibração dos fins-de-curso deve ser repetido.

A figura 105 apresenta, de uma forma sucinta, a sequência de calibração do sistema de movimentação seguida, mostrando os comandos em código g para fazer as correções necessárias.

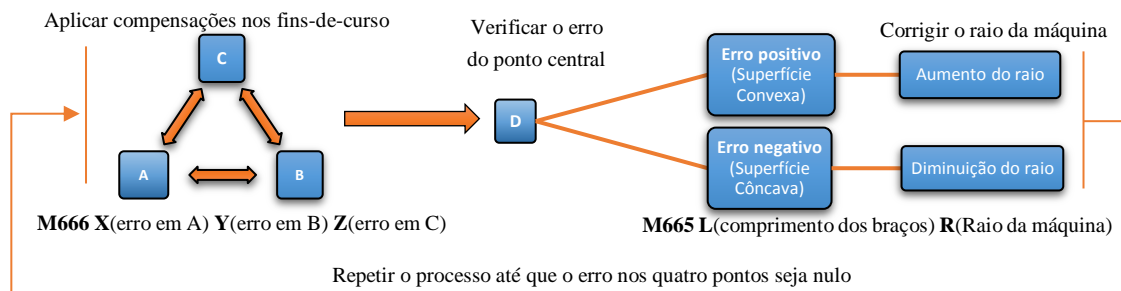


Figura 105 - Processo de calibração da máquina usando comandos em código G.

4.5.3 Impressões teste

Após efetuar as calibrações necessárias foram feitas várias impressões para confirmar o funcionamento correto da máquina, verificando também o funcionamento correto do painel de controlo e do botão de emergência. As peças impressas serviram também para verificar a qualidade de impressão e a fiabilidade dimensional em relação aos modelos virtuais.

Para fazer a preparação das peças usou-se o *software Cura* utilizando posteriormente o *software Repetier-Host* para enviar as instruções de impressão para a impressora. Usou-se filamentos de PLA em que se definiu as temperaturas de 200°C para o extrusor e 55°C para a base aquecida. Para estes testes usou-se apenas um alimentador de filamento, pelo que não se testou a máquina para impressões multimaterial.

Em primeiro lugar desenhou-se um cubo com 20mm de lado e preparou-se a impressão. Esta peça serviu para averiguar possíveis erros dimensionais na máquina. Escolheu-se um enchimento de 30% e uma velocidade de impressão de 60mm/s. Após a impressão mediu-se os lados do cubo com um paquímetro. As arestas do cubo foram posicionadas paralelamente aos eixos cartesianos da máquina.

Foi possível concluir que existem erros na ordem dos 0,07mm nas arestas laterais do cubo (fig. 106). A forma mais fácil de colmatar este tipo de erro é modificar a escala das peças a imprimir nesta máquina que pode ser feita na maior parte dos *softwares* CAM para impressão 3D.

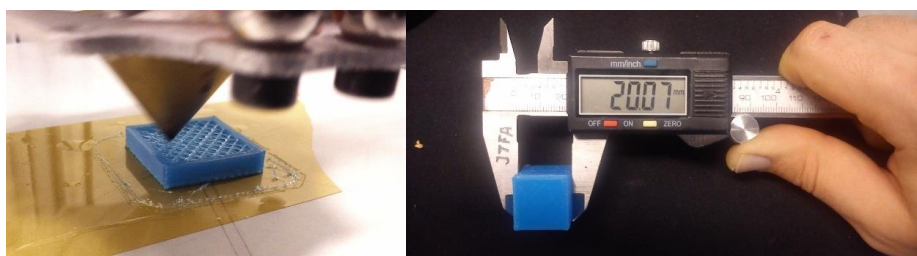


Figura 106 – Impressão e medição das arestas laterais de um cubo com 20mm de lado.

De seguida desenhou-se um pequeno cilindro com 15mm de altura e 12mm de diâmetro. Nesta peça alterou-se as alturas de camada ao longo da sua altura em 0,3mm, 0,2mm e 0,1mm

(fig. 107). Esta peça permitiu comparar a eficácia de impressão de um objeto simples com diferentes alturas de camada.

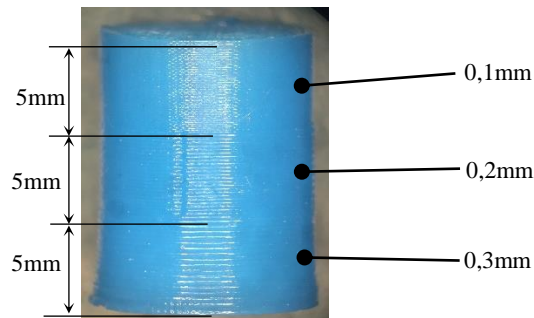


Figura 107 - Cilindro impresso com diferentes alturas de camada.

Por fim foram impressas peças que permitiram analisar as impressões de uma forma qualitativa. Imprimiu-se duas peças (fig.108; a e b) com detalhes finos a uma velocidade de 80mm/s. A outra peça (fig.108 c), foi fabricada usando uma velocidade relativamente elevada tanto de impressão como de movimentação, de 150mm/s e 250mm/s respetivamente. Estes parâmetros permitiram avaliar a qualidade de impressão para altas velocidades. Todos os modelos foram feitos usando uma altura de camada de 0,2mm. As peças impressas estão disponíveis na página *web Thingiverse* e estão protegidas sob a licença *Creative Commons*.

Estas impressões permitiram concluir que os detalhes finos são preservados desde que a velocidade seja relativamente baixa. Para as velocidades superiores, os acabamentos das peças foram prejudicados. Estes defeitos podem estar associados ao facto do sistema de extrusão não ser capaz de acompanhar estas velocidades de impressão. Outra possível razão será o facto do material não ser capaz de solidificar com rapidez suficiente, antes que seja depositada a camada seguinte. Desta forma, seria interessante o uso de uma ventoinha de arrefecimento capaz de produzir um maior fluxo de ar.

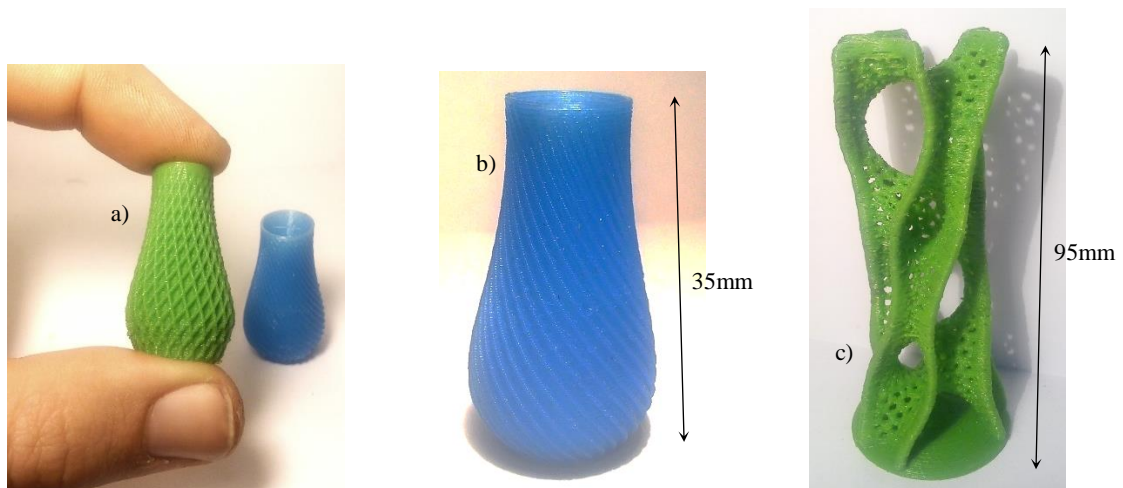


Figura 108 - Jarros² (a) e (b) impressos a uma velocidade de 80mm/s e torre³ (c) impressa a uma velocidade de 150mm/s.

² (Spiral Vase) por BigBadBison - <http://www.thingiverse.com/thing:570288>

³ (Voronoi D Tower ¼ res ½ size by @Dizingof) por RichRap - <http://www.thingiverse.com/thing:24123>

5 Conclusões

O desenvolvimento, fabrico, montagem e teste da impressora delta foram realizados com sucesso, seguindo a metodologia delineada.

O desenho do protótipo virtual foi uma mais-valia para o projeto, por tornar possível a exploração de várias soluções construtivas, iteração e teste das montagens e desenvolvimento de peças personalizadas antes de passar ao seu fabrico.

As ferramentas de cálculo e as relações geométricas desenvolvidas mostraram-se úteis para o dimensionamento da impressora. As simplificações e situações hipotéticas de funcionamento consideradas durante a fase de dimensionamento e cálculo das solicitações mecânicas geraram os resultados esperados. Estas foram feitas tomando sempre uma posição conservativa pelo que alguns dos componentes foram sobredimensionados.

A disponibilidade de *softwares* livres de controlo e de CAM para a impressora foi útil no decorrer do projeto, nomeadamente, para a impressão dos componentes necessários, configuração do *firmware*, calibração e impressão de peças teste. O projeto *RepRap* forneceu recursos que ajudaram no desenvolvimento desta impressora. O acesso à sua vasta documentação ajudou nas fases de dimensionamento e seleção de componentes.

A elevada oferta no mercado de componentes para impressoras 3D permitiu também focar o trabalho no desenvolvimento apenas de peças personalizadas a partir das características-alvo estabelecidas no início do projeto. Deste modo, foi possível a sua conclusão num intervalo de tempo relativamente curto.

Os processos de fabrico por CNC, tais como o funcionamento, a maquinaria e a impressão 3D, permitiram a produção de forma eficiente das peças desenvolvidas, evidenciando a sua utilidade na produção de peças únicas ou de pequenas séries, ideais para o desenvolvimento de protótipos como este.

As impressoras delta, tal como outros robôs paralelos, apresentam uma calibração algo difícil. Esta deve ser feita após a verificação das dimensões e geometria da máquina. O método iterativo seguido para a calibração é uma solução prática mas demorada.

A precisão dimensional das peças testadas foi aceitável na medida em que os erros foram na ordem das centésimas de milímetros. A altura de camada mínima testada foi de 0,1mm que apresentou um bom acabamento superficial. Para impressões a velocidades de 80mm/s os pequenos detalhes nas peças foram preservados, o mesmo não aconteceu para velocidades de impressão de 150mm/s. Será interessante averiguar melhor qual a relação qualidade/velocidade para esta impressora.

A construção deste tipo de impressoras é relativamente simples, tendo em conta os vários planos de simetria que apresenta. Desta forma, existe um menor número de componentes únicos, o que pode tornar este tipo de impressoras uma boa opção para o fabrico em escala com o objetivo de reduzir o seu custo total.

O chassis, feito com perfis extrudidos e peças impressas, revelou-se bastante estável para o funcionamento a velocidades elevadas. O microcontrolador selecionado mostrou-se capaz para o funcionamento a velocidades de movimentação na ordem dos 200mm/s. No entanto foi necessário baixar a taxa de cálculo deste, o que pode ter afetado a resolução.

Mesmo com os motores de passo desligados, os carris mantêm-se na sua posição. Este efeito poderá estar associado ao binário em repouso destes motores e ao atrito no sistema de transmissão. O não deslizamento dos carris em repouso é desejável pois desta forma o extrusor não se move e embate na base de impressão quando a máquina é desligada.

No total, estima-se que o custo de material ronde, no máximo, os 600€. Esta estimativa inclui as peças reaproveitadas e fabricadas no INEGI. Os custos das peças adquiridas no mercado para este projeto custaram por volta dos 300€ (Anexo F). O custo deste projeto foi aceitável, tendo em conta que possui características de funcionamento comparáveis com as impressoras analisadas no mercado. Por outro lado, a vantagem do desenvolvimento de uma impressora em vez de comprar uma já pronta, foi a adição de funcionalidades personalizadas, como o bico extrusor multimaterial e a base de impressão aquecida, assim como a definição do volume de impressão pretendido.

Em suma, possuindo recursos para o fabrico de peças, tempo e um investimento modesto é possível o desenvolvimento de impressoras 3D do tipo FDM com características personalizadas, apoiando-se em recursos e conhecimentos ao alcance de todos, disponibilizados no âmbito de projetos como o *RepRap* e outros semelhantes com modelos de desenvolvimento *open-source*. A implementação de uma cinemática paralela, como delta linear, poderá ser a forma de tornar os processos de impressão por FDM mais rápidos e precisos a custos mais baixos.

Na tabela 14 estão sumarizadas algumas das principais características da impressora desenvolvida neste projeto.

Tabela 14 - Características da impressora delta desenvolvida e construída neste projeto.

Volume de impressão	Ø200x500mm
Materiais que imprime	PLA (ABS por testar)
Diâmetro do filamento	1,75 mm
Diâmetro do bico extrusor	0,4 mm
Resolução de camada	100 µm
Conectividade	USB e Cartão SD
Eletrónica	Open-source (Baseado em Arduino)
Resolução XY (teórica)	<92 µm
Resolução Z (teórica)	12,5 µm
Velocidade máxima de impressão	150 mm/s
Velocidade máxima de posicionamento	200 mm/s
Temperatura máxima do extrusor	240°C
Temperatura máxima da base	110°C
Número de extrusores	3 (extrusor de mistura)
Preço	600€ (estimativa ⁴)

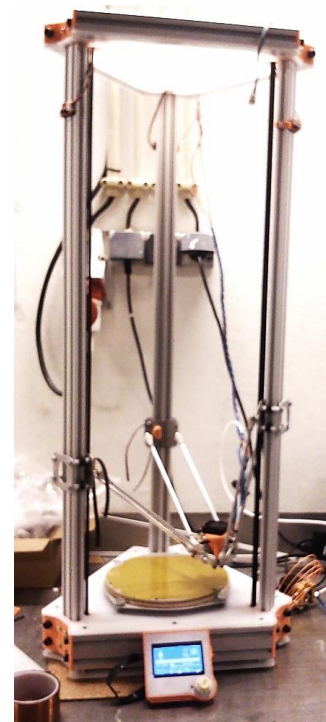


Figura 109 - Impressora 3D FDM do tipo delta desenvolvida e construída neste projeto.

⁴ Ver Anexo F.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros propõe-se diferentes tarefas com o objetivo de explorar as funcionalidades da impressora e analisar com maior detalhe o funcionamento deste tipo de impressoras.

A prioridade estará no desenvolvimento de um suporte para as bobinas de filamento. Para as impressões teste, em que se consumiu uma quantidade reduzida de material, não se justificou o desenvolvimento de um suporte para o filamento. No entanto, para impressões longas, em que é consumida uma maior quantidade de material, será necessário um sistema de suporte das bobinas. Estes suportes poderão ser montados no topo da impressora e deverão ser capazes de suportar o peso das três bobinas de filamento e oferecer uma resistência mínima à rotação das mesmas.

Em segundo lugar, e visto que não foi possível explorar com detalhe neste projeto, a caracterização e análise do funcionamento do extrusor multimaterial será uma das tarefas a realizar. Nesta análise poderão ser feitas impressões de peças com diferentes cores ou materiais, explorando as suas funcionalidades de mistura e constatarando a sua eficácia.

Outros testes a fazer será a impressão de materiais de elevada distorção térmica, como o ABS e o HIPS, aferindo a influência da base aquecida. Poderá ser contemplada a possibilidade de adicionar uma câmara aquecida à impressora. Esta adaptação seria relativamente simples através da adição de uns painéis laterais formando uma câmara climatizada em torno da área de impressão.

Visto que a calibração manual é um processo iterativo e demorado será interessante a montagem de um detetor de proximidade no efetor. Tendo em conta que a superfície de impressão é metálica, poderá ser usado um detetor indutivo. Com o auxílio deste detetor, e programando uma rotina de calibração, este processo tornar-se-ia mais prático.

Seria interessante um estudo da resolução e repetibilidade de posicionamento do efetor e comparar com os valores teóricos calculados. Este processo poderá ser feito com um comparador montado no efetor, enviando comandos de movimentação e registando os resultados. Estes podiam também ser comparados com as características das impressoras cartesianas presentes no laboratório.

Visto que o cálculo das cargas foi abordado num contexto de dimensionamento, a simulação do funcionamento da máquina num software integrado, como por exemplo o CATIA, seria uma boa opção para a determinação dessas cargas de uma forma mais realista. O conhecimento destas cargas seria uma mais-valia para a otimização dos componentes através de análises estruturais de elementos finitos com o intuito de reduzir a massa dos componentes móveis, por exemplo.

Por fim, seria interessante a implementação de um sistema de monitorização e aquisição de dados à entrada da energia elétrica da impressora, de modo a verificar a energia despendida nos processos de impressão. Estas tarefas foram sumarizadas e organizadas por graus de prioridade na tabela 15.

Tabela 15 – Proposta para trabalhos futuros de modo a explorar funcionalidades e otimizar as características da impressora desenvolvida.

Prioridade	Tarefa	Objetivo
Alta	Desenvolvimento de um suporte para as bobinas de filamento	Possibilitar impressões longas
Alta	Caracterização do funcionamento do extrusor	Explorar a impressão multimaterial
Média	Impressão de materiais como o ABS ou o HIPS.	Verificar a eficácia na impressão de materiais com elevada dilatação térmica.
Média	Montagem de um detetor de proximidade no efetor	Auxiliar na calibração do sistema de movimentação
Média	Caracterização do sistema de posicionamento	Calcular a resolução real e repetibilidade
Baixa	Simulação dinâmica do movimento da impressora	Calcular as cargas de origem dinâmica
Baixa	Criação de um sistema auxiliar de aquisição de dados	Monitorizar a energia despendida nas impressões

Referências

1. Wohlers, T.T., et al., *Wohlers Report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry : Annual Worldwide Progress Report*. 2016: Wohlers Associates.
2. Crawford, R.H. and J.J. Beaman, *Solid freeform fabrication*. IEEE Spectrum, 1999. 36(2): p. 34-43.
3. Ambrosi, A. and M. Pumera, *3D-printing technologies for electrochemical applications*. Chemical Society Reviews, 2016. 45(10): p. 2740-2755.
4. All3DP. *STL file format for 3D printing*. 2016; Disponível em: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>.
5. Bateman, R. and K. Cheng, *Rapid manufacturing as a tool for agile manufacturing: Application and implementation perspectives*. International Journal of Agile Manufacturing, 2006. 9(1): p. 39-52.
6. Hopkinson, N., R.J.M. Hague, and P.M. Dickens, *Rapid Manufacturing: An industrial revolution for the digital age*. 2006: John Wiley and Sons. 1-285.
7. Cotteleer, M. and J. Joyce, *3D opportunity: Additive Manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Deloitte Review, 2014. 14.
8. Banks, J., *Adding value in Additive Manufacturing : Researchers in the United Kingdom and Europe Look to 3D Printing for Customization*. IEEE Pulse, 2013. 4(6): p. 22-26.
9. Mertz, L., *New world of 3-D printing offers "completely new ways of thinking": Q&A with author, engineer, and 3-D printing expert Hod Lipson*. IEEE Pulse, 2013. 4(6): p. 12-14.
10. Lipson, H. and M. Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*. 2013: Wiley Publishing. 280.
11. Zadpoor, A.A. and J. Malda, *Additive Manufacturing of biomaterials, tissues, and organs*. Annals of Biomedical Engineering, 2016: p. 1-11.
12. Lee, C.W., et al., *Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition modelling*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004. 23(1-2): p. 93-101.
13. GmbH, R.B., *Additive Manufacturing - A game changer for the manufacturing industry?*, R. Berger, Editor. 2013.
14. Schniepp, T.J. *Design guide development for additive manufacturing (FDM) of composite tooling*. in *International SAMPE Technical Conference*. 2016.
15. Schoffer, F. *How expiring patents are ushering in the next generation of 3D printing*. 2016 ; Disponível em: <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-ushering-in-the-next-generation-of-3d-printing/>. (acedido a 21 de Setembro de 2016)
16. ASTM_International, *Standard terminology for additive manufacturing technologies*. 2012. F2792 – 12a.
17. ManufacturingGuide. *Fused Deposition Modeling, FDM*. 2016; Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. (acedido a 21 de Setembro de 2016)
18. Gartner, *Gartner identifies the top 10 strategic technology trends for 2016*, I. Gartner, Editor. 2015: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3143521>. (acedido a 23 de Setembro de 2016)

19. Horvath, J., *Mastering 3D printing*. 2014: Apress. 224.
20. SustainablePlastics. *About bioplastics*. 2016; Disponível em: <http://www.sustainableplastics.org/about>. (acedido a 10 de Outubro de 2016)
21. González, S.G., *Impresión 3D*. 1ªed. 2016: MARCOMBO
22. 3DVerkstan. *Getting better prints*. 2015; Disponível em: <http://support.3dverkstan.se/article/30-getting-better-prints>. (acedido a 15 de Outubro de 2016)
23. 3DMatter. *What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?* 2015; Disponível em: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>. (acedido a 14 de Outubro de 2016)
24. Cain, P. *Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing*. 2016; Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing>. (acedido a 26 de Outubro de 2016)
25. PFI. *3D Printing*. 2016; Disponível em: <http://www.pfiaem.com/additive-manufacturing/3d-printing/>. (acedido a 10 de Outubro de 2016)
26. Simplify3D. *Rafts, skirts and brims!* 2016; Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/articles/rafts-skirts-and-brims/>. (acedido a 10 de Janeiro de 2017)
27. Thingiverse. *Digital designs for physical objects*. 2016; Disponível em: <https://www.thingiverse.com/>. (acedido a 10 de Dezembro de 2016)
28. Choudhari, C.M. and V.D. Patil. *Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016.
29. Belter, J.T. and A.M. Dollar, *Strengthening of 3Dprinted fused deposition manufactured parts using the fill compositing technique*. PLOS ONE, 2015. 10(4): p. e0122915.
30. Singamneni, S., et al., *Modeling and evaluation of curved layer fused deposition*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. 212(1): p. 27-35.
31. Muthu, S.S. and M.M. Savalani, *Handbook of sustainability in additive manufacturing*. 2016: Springer Singapore.
32. Matsuzaki, R., et al., *Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation*. Scientific Reports, 2016. 6: p. 23058.
33. Průša, J. *Original Prusa I3 MK2 multimaterial mpgrade release*. 2016; Disponível em: <http://www.prusaprinters.org/original-prusa-i3-mk2-multi-material-upgrade-release/>. (acedido a 16 de Dezembro de 2016)
34. Zmorph. *The Multitool 3D Printer*. 2016; Disponível em: <https://zmorph3d.com>. (acedido a 16 de Dezembro de 2016)
35. Koren, Y., *Robotics for engineers*. 1985: McGraw-Hill.
36. Groover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 2002: Wiley.
37. Carrara, V., *Apostila de Robótica*. 2009: Universidade Braz Cubas.

38. ABControls. *Mitsubishi robotic arms*. 2013; Disponível em: http://www.abcontrols.com/robotic_arms/mitsubishi_robotic_arms.php. (acedido a 13 de Janeiro de 2017)
39. PhysikInstrumente. *Hexapods / Parallel Kinematics*. 2016; Disponível em: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/parallel-kinematic-hexapods/>.(acedido a 13 de Janeiro de 2017)
40. Pandilov, Z. and V. Dukovsky, *Comparison of the characteristics between serial and parallel robots*. Acta Technica Corviniensis, 2014. Bulletin Of Engineering (Fascículo 1).
41. Briot, S. and I. Bonev, *Are parallel robots more accurate than serial robots?* CSME Transactions, 2007. 31(4): p. 445-456.
42. DeltaMaker. *DeltaMaker 2T: Large format 3D printer* 2016; Disponível em: <https://www.deltamaker.com/>. (acedido a 13 de Janeiro de 2017)
43. Makkusu. *CoreXY printer - 176*. 2015; Disponível em: <https://maxdesign1990.wordpress.com/2015/07/19/core-xy-3d-printer/core-xy-printer-176/>.(acedido a 13 de Janeiro de 2017)
44. RepRap.org. *Wally*. 2015; Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Wally>. (acedido a 13 de Janeiro de 2017)
45. Bonev, I. *Delta Parallel Robot - the story of success*. 2001; Disponível em: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>. (acedido a 20 de Outubro de 2016)
46. Clavel, R., *Device for the movement and positioning of an element in space*. 1990, Google Patents.
47. ABBRobotics. *Robô IRB 360 – FlexPicker*. 2016; Disponível em: <http://new.abb.com/food-beverage/pt/alimentos-bebidas/references/flexpicker-irb-360>. (acedido a 17 de Dezembro de 2016)
48. SatyamMechanicals. *DELTA Robots*. 2016; Disponível em: <http://mechanical.satyamtech.com/robotics-machines/>. (acedido a 17 de Dezembro de 2016)
49. Bell, C., *3D Printing with delta printers*. 2015: Apress. 368.
50. SeeMeCNC. *Orion Delta desktop 3D printer*. 2016; Disponível em: <https://www.seemecnc.com/products/orion-delta-3d-printer>. (acedido a 28 de Dezembro de 2016)
51. 3Dprint.com. *Atom 2.0, 'The most refined delta 3D printer yet'* 2015; Disponível em: <https://3dprint.com/46719/atom-2-0-3d-printer-2/>.(acedido a 28 de Dezembro de 2016)
52. RepRap.org. *Rostock mini*. 2016; Available from: http://reprap.org/wiki/Rostock_mini.
53. LoneShopper. *ANYCUBIC Kossel delta 3D printer*. 2016; Disponível em: <http://www.loneshopper.com>. (acedido a 2 de Janeiro de 2017)
54. FlightFixit. *Aluminum extrusion 3D printer carriage*. 2016; Disponível em: <http://www.thingiverse.com/thing:1268215>. (acedido a 2 de Janeiro de 2017)
55. MatterHackers. *OpenBeam Kossel pro delta 3D printer kit*. 2016; Disponível em: <https://www.matterhackers.com/store/printer-kits/openbeam-kossel-pro>. (acedido a 2 de Janeiro de 2017)

56. Pinshape. *Direct drive vs Bowden extruder guide and calibration Tips*. 2016; Disponível em: <https://pinshape.com/blog/direct-drive-vs-bowden-extruder-guide/>. (acedido a 5 de Janeiro de 2017)
57. RepRap.org. *Erik's Bowden extruder*. 2015; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Erik's_Bowden_Extruder. (acedido a 5 de Dezembro de 2016)
58. RepRap.org. *List of firmware*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/List_of_Firmware. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
59. RepRap.org. *RUMBA*. 2016; Disponível em: <http://www.reprap.org/wiki/RUMBA>. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
60. Smoothieware. *Smoothieboard*. 2016; Disponível em: <http://smoothieware.org/smoothieboard>. (acedido a 16 de Dezembro de 2016)
61. Octoprint. *OctoPi*. 2016; Available from: <http://octoprint.org/>. (acedido a 16 de Dezembro de 2016)
62. WASP. *WASP - World's Advanced Saving Project*. 2016; Disponível em: <http://www.wasproject.it/w/en/about-us/>. (acedido a 5 de Dezembro de 2016)
63. WASP. *Stampa 3D*. 2016; Disponível em: <http://www.wasproject.it/w/stampa-3d/>. (acedido a 5 de Dezembro de 2016)
64. WASP. *Clay Kit 2.0 with LDM Wasp extruder*. 2016; Disponível em: <http://www.personalfab.it/en/products/clay-extruder-kit-2-0/>. (acedido a 5 de Dezembro de 2016)
65. SpiderBot. *Spiderbot 3D printer kits*. 2016; Disponível em: <http://www.spiderbot.eu/en/>. (acedido a 5 de Dezembro de 2016)
66. Pollen. *Pollen PAM - The advanced 3D printer*. 2016; Disponível em: www.pollen.am. (acedido a 7 de Dezembro de 2016)
67. OSHWA. *Open Source hardware logo*. 2015; Disponível em: <http://www.oshwa.org/open-source-hardware-logo/>. (acedido a 8 de Dezembro de 2016)
68. OSHWA. *OSHW community survey 2013*. 2013; Disponível em: <http://www.oshwa.org/oshw-community-survey-2013/>. (acedido a 8 de Dezembro de 2016)
69. Malone, E. and H. Lipson, *Fab@Home: the personal desktop fabricator kit*. Rapid Prototyping Journal, 2007. 13(4): p. 245-255.
70. Jones, R., et al., *RepRap - the replicating rapid prototyper*. Robotica, 2011. 29: p. 177-191.
71. RepRap.org. *Darwin*. 2014; Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Darwin>. (acedido a 12 de Outubro de 2016)
72. Moilanen, J. and T. Vadén, *3D printing community and emerging practices of peer production*. 2013. 2013.
73. RepRap.org. *Helium Frog Delta Robot*. 2015; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Helium_Frog_Delta_Robot. (acedido a 21 de Dezembro de 2016)
74. RepRap.org. *Rostock*. 2016; Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Rostock>. (acedido a 21 de Dezembro de 2016)

75. RepRap.org. *Kossel*. 2016; Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Kossel>. (acedido a 21 de Dezembro de 2016)
76. Evans, B., *Beginning Arduino programming*. 2011: Apress. 272.
77. Schmidt, M., *Arduino: A quick-Start guide*. 2015: Pragmatic Programmers, LLC.
78. 3DSsystems. *CubePro®*. 2016; Disponível em: <https://www.3dsystems.com/shop/cubepro/techspecs>. (acedido a 12 de Fevereiro de 2017)
79. RepRap.org. *Delta geometry*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Delta_geometry. (acedido a 6 de Outubro de 2016)
80. Ma, R. *Delta Printer kinematics Part 1 - Calibration and leveling*. 2015; Disponível em: <http://blog.rymnd.com/delta-kinematics-1/>. (acedido a 10 de Dezembro de 2016)
81. Ma, R. *Delta printer kinematics part 2 - Towards an optimal design*. 2015; Disponível em: <http://blog.rymnd.com/delta-kinematics-2/>. (acedido a 10 de Dezembro de 2016)
82. Kelaiaia, R., O. Company, and A. Zaatri, *Multiobjective optimization of a linear delta parallel robot*. Mechanism and Machine Theory, 2012. 50: p. 159-178.
83. RepRap.org. *Diamond hotend*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend. (acedido a 9 de Outubro de 2016)
84. RepRap.org. *Joints for Delta Printer*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Joints_for_Delta_Printer. (acedido a 7 de Novembro de 2016)
85. Birenboim, A. *Calibration of delta 3D printers*. 2014; Disponível em: <http://boim.com/DeltaUtil/CalDoc/Calibration.html>. (7 de Novembro de 2016)
86. OpenBuilds. *V-Slot® Linear Rail*. 2016; Disponível em: <http://openbuildspartstore.com/v-slot-linear-rail/>. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
87. OpenBuilds. *Delrin Mini V Wheel™ Kit*. 2016; Disponível em: <http://openbuildspartstore.com/delrin-mini-v-wheel-kit/>. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
88. Solarbotics. *Stepper motor basics*. Disponível em: <http://solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
89. Sandin, P., *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. 2003: McGraw-Hill Education.
90. PrusaPrinters. *PrusaPrinters calculator*. 2015; Disponível em: <http://www.prusaprinters.org/calculator/>. (acedido a 10 de Novembro de 2016)
91. Walter, M. *How accurate is microstepping really?* Hackaday 2016; Available from: <http://hackaday.com/2016/08/29/how-accurate-is-microstepping-really/>. (acedido a 20 de Novembro de 2016)
92. StockDriveProducts/SterlingInstrument, *Handbook of timing belts, pulleys, chains and sprockets*. (acedido a 20 de Novembro de 2016)
93. StepperOnline. *Nema 17 stepper motor 17HS16-2004S*. 2016; Disponível em: <http://www.omc-stepperonline.com/download/pdf/17HS16-2004S1.pdf>. (acedido a 28 de Novembro de 2016)
94. Orientalmotor. *Speed - torque curves for stepping motors* Disponível em: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/pdfs/SpeedTorqueCurves.pdf>. (acedido a 20 de Novembro de 2016)

95. Oberhauser, J.Q., *Design, construction, control, and analysis of linear delta robot*, in *Russ College of Engineering and Technology*. 2016, Ohio University. p. 136.
96. BoschGroup, Rexroth- *Profiles*. 2016; Disponível em: https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/assembly_technology/pdfs/8981500201.pdf. (acedido a 10 de Janeiro de 2017)
97. Ashby, M.F., *Materials selection in mechanical design*. 2004: Elsevier Science.
98. RepRap.org. *Wade's geared extruder*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Wade's_Geared_Extruder. (acedido a 20 de Dezembro de 2016)
99. Heywood, M. *Airtripper extruder filament force sensor – Introduction*. 2013; Disponível em: <http://airtripper.com/1338/airtripper-extruder-filament-force-sensor-introduction/>. (acedido a 26 de Novembro de 2016)
100. Heywood, M. *3D Printer extruder filament drive gear review & benchmark*. 2013; Disponível em: <http://airtripper.com/1676/3d-printer-extruder-filament-drive-gear-review-benchmark/>. (acedido a 26 de Novembro de 2016)
101. Fueckert, O. *Tips for printing with flexible filaments*. 2016; Disponível em: <https://www.voltivo.com/printing-flexible-filaments/>. (acedido a 26 de Novembro de 2016)
102. Arduino. *Arduino Mega*. 2016; Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>. (acedido a 5 de Outubro de 2016)
103. RepRap.org. *RAMPS 1.4*. 2016; Available from: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4. (acedido a 5 de Outubro de 2016)
104. Pololu. *Stepper motor drivers*. 2016; Disponível em: <https://www.pololu.com/category/120/stepper-motor-drivers>. (acedido a 5 de Outubro de 2016)
105. AllegroMicroSystems, L. *A4988 - DMOS Microstepping driver with translator and overcurrent protection*. Disponível em: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Motor-Driver-And-Interface-ICs/Bipolar-Stepper-Motor-Drivers/A4988.aspx>. (acedido a 5 de Outubro de 2016)
106. RepRap.org. *RepRapDiscount full graphic smart controller*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/RepRapDiscount_Full_Graphic_Smart_Controller. (acedido a 5 de Outubro de 2016)
107. RepRap.org. *Power supply*. 2016; Disponível em: http://reprap.org/wiki/Power_Supply. (acedido a 3 de Dezembro de 2016)
108. Marlin. *Configuring Marlin*. 2016; Disponível em: <http://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html> (acedido a 10 de Dezembro de 2016)
109. Tinygadgets. *Scary maths or how to convert from x,y,z coordinates to delta robot position*. 2013; Disponível em: <http://robinsonia.com/wp/?p=161>. (acedido a 1 de Outubro de 2016)

ANEXO A: Cinemática Delta

As seguintes figuras mostram as expressões de um método de determinação da posição do efector em função das dimensões da máquina e das alturas dos carris, seguindo um método de cinemática direta (adaptado de [109]). As torres A, B e C correspondem às torres X, Y e Z usadas ao longo deste relatório.

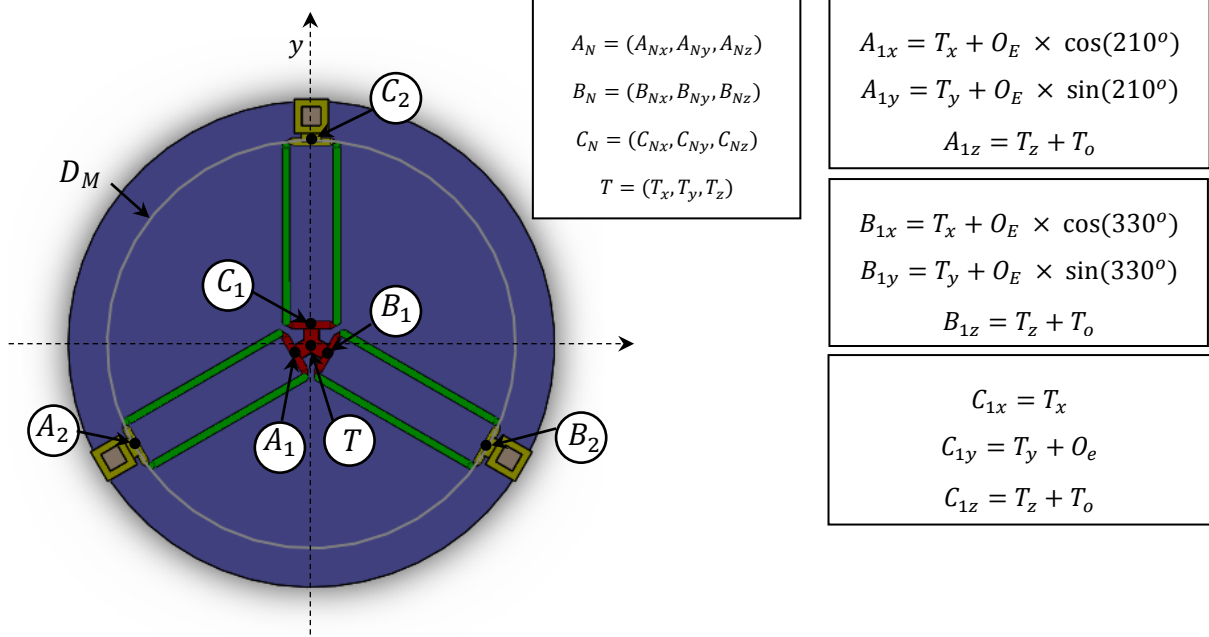


Figura 110 - Coordenadas de interesse para calcular a posição do do efector no espaço.

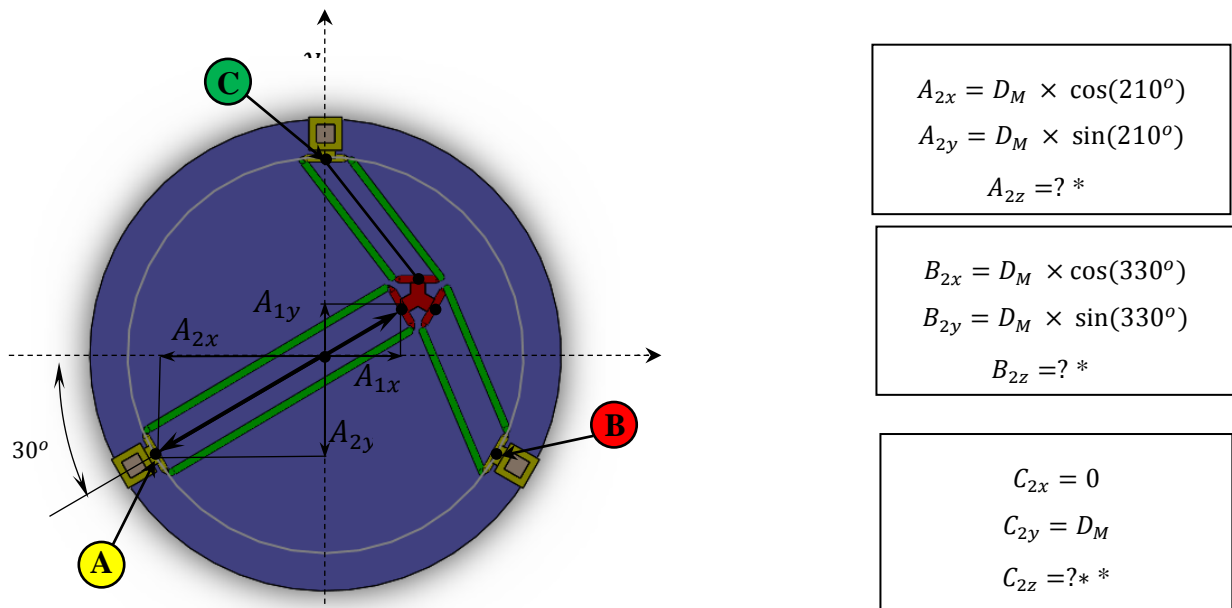
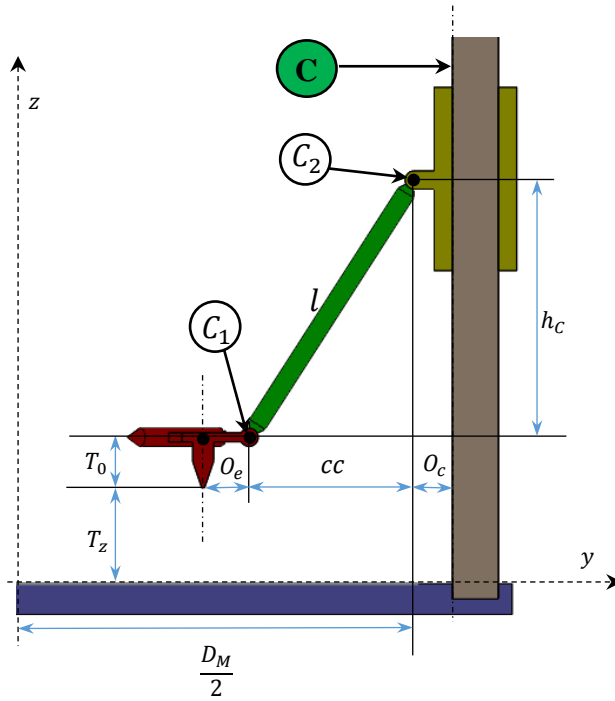


Figura 111 - Cálculo das coordenadas para os pontos A1 e A2 para uma posição genérica.



$$aa = \sqrt{(A_{2x} - A_{1x})^2 + (A_{2y} - A_{1y})^2}$$

$$bb = \sqrt{(B_{2x} - B_{1x})^2 + (B_{2y} - B_{1y})^2}$$

$$cc = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2}$$

$$h_A = \sqrt{l^2 - aa^2}$$

$$h_B = \sqrt{l^2 - bb^2}$$

$$h_C = \sqrt{l^2 - cc^2}$$

$$* A_{2z} = T_z + O_E + h_A$$

$$* B_{2z} = T_z + O_E + h_B$$

$$* C_{2z} = T_z + O_E + h_C$$

Figura 112 - Cálculo da relação entre as alturas dos carris e os pontos A, B e C.

A determinação da posição do bico extrusor em função da altura dos carris passa por calcular um sistema de equações. Este cálculo pode ser descrito pela expressão:

$$T = f(h_A, h_B, h_C)$$

Os softwares de controle para impressoras delta calculam o processo inverso: a partir de uma posição para o efetor desejada são calculados e executados os comandos necessários para que os carris se movimentem para as alturas calculadas. Desta forma, este processo baseia-se num conjunto de expressões calculadas através da cinemática inversa da máquina.

ANEXO B: *Benchmark* de impressoras delta

Legenda	Marca	Modelo	Volume de impressão (mm)	Materiais	Diâmetro do filamento (mm)	Diâmetro do bico extrusor (mm)	Altura de camada (µm)	Conectividade	Eletrônica	Resolução de posicionamento (µm)		Velocidade máxima (mm/s)		Temperatura máxima (°C)		Nº de extrusores	Preço (€)
										XY	Z	Impressão	Posicionamento	Extrusor	Base de impressão		
A	Delta Go	Deltaprinter	Ø215	PLA	1,75	0,4	100	USB	opensource	11	2,5	●	●	●	●	1	470
			400														
B	SeeMeCNC	Rostock MAX V3	Ø265	PLA, ABS	1,75	●	100	USB	opensource	●	●	100	300	280	100	1	1790
			400														
C	Delta Maker	2T	Ø240	PLA, ABS e outros	1,75	0,4	100	Wifi, Ethernet	opensource	●	●	150	300	●	●	1	3770
			260														
D	He3D	K280	Ø280	PLA	1,75	0,4	50	USB, Cartão SD	opensource	●	●	●	300	270	110	1	565
			600														
E	BlueFrog	Mirror	Ø180	PLA, ABS, PETG, PVA	1,75	0,4	50	USB, Cartão SD	●	10	10	150	250	●	●	1	950
			255														
F	DeltaWASP	20 40	Ø200	PLA, ABS, HIPS, PETG	1,75	0,4	50	Cartão SD	●	●	●	●	300	260	100	1	2370
			400														
G	Spiderbot	V2.2	Ø180	PLA, ABS, HIPS	1,75	0,5	150	●	●	11	6	60	300	260	120	1 ou 2	1800
			200														
H	TIKO	3D	Ø125	PLA, ABS	1,75	●	50	Wifi	●	●	●	30	●	250	●	1	190
			125														
I	ATOM	2.0	Ø220	PLA, ABS	1,75	●	50	USB, Cartão SD	opensource	●	●	●	●	●	●	1	1610
			320														
J	Geetech	Rostock 301	Ø170	PLA, ABS e outros	1,75	0,4	100	USB, Cartão SD	opensource	50	●	120	120	240	110	3	425
			230														
K	Pollen	Pam	Ø300	Vários	●	●	40	Wifi, Ethernet	●	40	40	●	400	350	●	4	>8000
			300														
L	Afinibot	A2	Ø180	PLA, ABS e Nylon	1,75	0,4	100	USB, Cartão SD	opensource	●	●	100	150	●	●	1	300
			300														

Legenda

●	Desconhecido
●	Não tem



ANEXO C: Configuração do *firmware*

As seguintes tabelas mostram as principais configurações a fazer no *firmware Marlin* a partir do IDE do *Arduino* editando o subficheiro *configuration.h*.

Características gerais	Comando no <i>firmware</i>	Ação
	#define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB ⁵	Seleção da motherboard: RAMPS 1.4.
	#define DELTA	Seleção da geometria da máquina: Delta.
	#define DELTA_CALIBRATION_MENU	Ativação dos menus de calibração para a Delta.
	#define MIXING_EXTRUDER	Seleção de um extrusor com mistura de cores.
	#define REPRAP_DISCOUNT_FULL_GRAPHIC_SMART_CONTROLLER	Seleção do tipo de painel de controlo e LCD.
	#define U8GLIB_SH1106	Livraria de caracteres para o LCD 128x64.
	#define LCD_LANGUAGE pt	Menus em português.
	#define SDSUPPORT	Suporte de impressão por cartão SD.
	#define EEPROM_SETTINGS	Permitir gravar parâmetros na memória da máquina.

Geometria	Variável/Comando no <i>firmware</i>	Variável geométrica	Valor	Unidades
	DELTA_DIAGONAL_ROD	$l + 0,30$	260.30	mm
	DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET	$\frac{D_M}{2} + O_C$	177	mm
	DELTA_EFFECTOR_OFFSET	O_e	25.0	mm
	DELTA_CARRIAGE_OFFSET	O_c	17.0	mm
	DELTA_RADIUS	$\frac{D_M}{2} - O_e - O_C$	135	mm
	DELTA_PRINTABLE_RADIUS	$\frac{D_I}{2}$	100.0	mm
	MANUAL_Z_HOME_POS	$h + 45$	545.0	mm

Movimento	Característica	Variável/Comando no <i>firmware</i>	Eixo	Valor	Unidades
	Frequência de cálculo	DELTA_SEGMENTS_PER_SECOND	--	120	--
	Resolução dos motores de passo	DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT	X, Y e Z	80	Passos/mm
			Extrusores	48.35	Passos/mm
	Velocidade	DEFAULT_MAX_FEEDRATE	X, Y e Z	100	mm/s
			Extrusores	25	mm/s
	Aceleração	DEFAULT_ACCELERATION	X, Y, Z e Extrusores	1800	mm/s ²
		DEFAULT_MAX_ACCELERATION	X, Y e Z	2000	mm/s ²
			Extrusores	2000	mm/s ²
		DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION	X, Y e Z	800	mm/s ²
	Sobre-aceleração	DEFAULT_XYJERK	X e Y	20	mm/s ³
		DEFAULT_ZJERK	Z	20	mm/s ³
		DEFAULT_EJERK	Extrusores	5	mm/s ³

⁵ O sufixo “EFB” refere-se às três saídas disponíveis na placa RAMPS que podem ser controladas por PWM a 12v que, para esta máquina, serão o extrusor, a ventoinha de arrefecimento e a base. (Extruder, Fan, Base)

Fins-de-curso	Variável/Comando no <i>firmware</i>	Torre	Valor booleano
	X_MAX_ENDSTOP_INVERTING	X	true
	Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING	Y	true
	Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING	Z	true

Temperatura	Componente	Variável/Comando no <i>firmware</i>	Valor	Unidades
	Extrusor	TEMP_SENSOR_0	1 ⁶	--
		HEATER_0_MAXTEMP	275	°C
	Cama	TEMP_SENSOR_BED	1	--
		BED_MAXTEMP	120	°C

Controlo PID	Componente	Variável/Comando no <i>firmware</i>	Parâmetro	Valor
	Extrusor	DEFAULT_Kp	P	22.2
		DEFAULT_Ki	I	1.08
		DEFAULT_Kd	D	114
	Cama	DEFAULT_bedKp	P	10.00
		DEFAULT_bedKi	I	.023
		DEFAULT_bedKd	D	305.4

A adição do 3º extrusor é feita atribuindo os três pinos de controlo para o motor de passo do alimentador, STEP, DIR e EN, a três pinos disponíveis na placa RAMPS. Esta atribuição é feita pela edição do subficheiro pins.h, adicionando os seguintes comandos:

```
#define E2_STEP_PIN 64
#define E2_DIR_PIN 59
#define E2_ENABLE_PIN 44
```

⁶ O valor 1 representa o facto de os sensores de temperatura serem termístores NTC de 100kOhm.

ANEXO D: Peças impressas por FDM

Peça		Qtd.	Material	Altura de camada (mm)	Enchimento (%)	Espessura de parede (mm)	Tempo total de impressão (h)	Peso total (g)	Custo estimado do material (€)
Canto de cima		3	PLA	0,2	20	1.2	9	102	2,04
Canto de baixo		3	PLA	0,2	20	1.2	18	213	4,26
Caixa do painel de controlo		1	PLA	0.2	15	1	2,5	24	0,48
Peça de montagem do extrusor		1	PLA	0,2	20	1	2	17	0,14
Peças de montagem da correia		3	PLA	0,2	15	0.8	1	9	0,18
Canal de Arrefecimento		1	PLA	0,2	5	0.8	0,5	4	0,08
Peça do fim-de-curso		3	PLA	0,2	15	0.8	0,5	3	0,06
Junções dos braços		6	ABS	0,15	20	0.4	1,5	12	1,08
Total							35	374g- PLA 12g - ABS	-8,30

ANEXO E: Peças Puncionadas

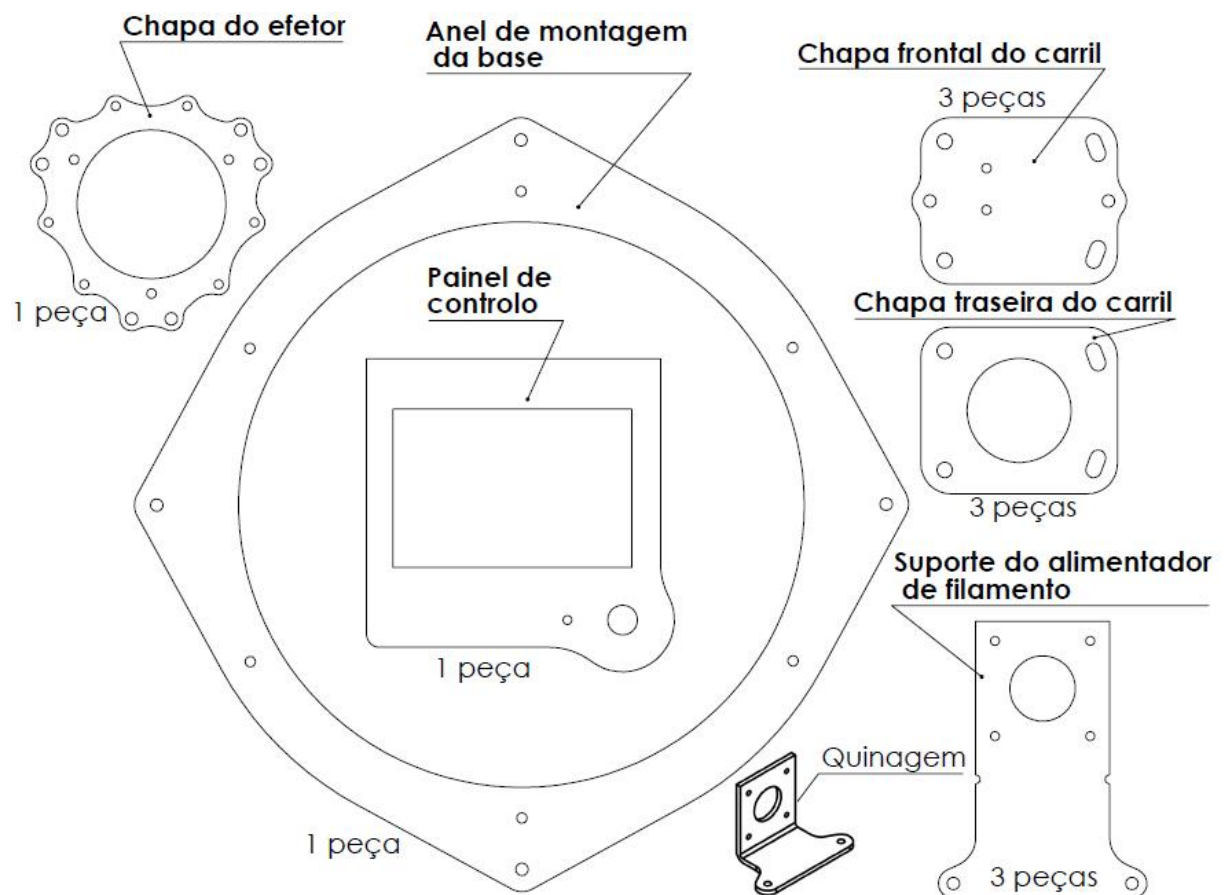


Figura 113 - Peças em chapa de alumínio puncionadas por CNC.

ANEXO F: Componentes adquiridos

De seguida é mostrada uma tabela com os principais componentes adquiridos no mercado. Estes não incluem os componentes fabricados ou reaproveitados das oficinas do INEGI. Desta forma, os painéis, os perfis laterais, todas as chapas puncionadas não fazem parte deste custo total.

A maior parte dos componentes foram adquiridos na loja *online Aliexpress*. Esta apresenta os preços mais baixos quando comparados com lojas locais. Em contrapartida, o tempo de entrega é bastante longo. Outras peças tais como os motores de passo, os perfis *v-slot* e as rótulas magnéticas foram adquiridas noutras lojas também *online*.

Tabela 16 - Lista de componentes adquiridos no mercado.

Produto	Qtd.	Custo unitário	Subtotal	Fornecedor
Arduino Mega 2560	1	8,00 €	8,00 €	AliExpress
RAMPS 1.4	1	4,00 €	4,00 €	AliExpress
Controlador A4988	6	0,80 €	4,80 €	AliExpress
Placa de expansão	1	1,50 €	1,50 €	AliExpress
Extrusor diamante	1	15,00 €	15,00 €	AliExpress
Resistência 40W	1	1,00 €	1,00 €	AliExpress
Termístor NTC 100Kohm	2	0,50 €	1,00 €	AliExpress
Fim-de-curso mecânico	3	0,30 €	0,90 €	AliExpress
Motores NEMA 17	6	12,50 €	75,00 €	StepperOnline
Par de polias GT2	3	1,50 €	4,50 €	AliExpress
Base aquecida	1	14,00 €	14,00 €	AliExpress
Rodas em acetal com rolamentos	12	0,80 €	9,60 €	AliExpress
Correia GT2 (10m)	1	7,50 €	7,50 €	AliExpress
Íman	12	0,30 €	3,60 €	ANYCUBIC
Esfera	12	0,15 €	1,80 €	ANYCUBIC
Painel de controlo	1	9,50 €	9,50 €	AliExpress
Alimentador	3	3,00 €	9,00 €	AliExpress
Ventoinha 40mm	1	2,00 €	2,00 €	Aquario
Ventoinha 30mm	1	2,00 €	2,00 €	AliExpress
Tubo Alumínio 6mm (1m)	2	2,60 €	5,20 €	Leroy Merlin
Tubo Alumínio 8mm (1m)	1	2,00 €	2,00 €	Leroy Merlin
Fonte de alimentação	1	24,00 €	24,00 €	AliExpress
Perfis v-slot 2040 (1m)	3	15,00 €	45,00 €	Leds & Chips
Parafusos diversos	1	40,00 €	40,00 €	Fabory
Peças impressas	1	8,30 €	8,30 €	—
			Total	
			€ 299,20	

Os componentes adquiridos rondaram os 300€. Estimou-se que o custo total para esta impressora estará compreendido dos 500 e os 600€ de modo a incluir os custos dos materiais reaproveitados, as peças fabricadas no INEGI e a mão de obra necessária.

ANEXO G: Desenhos das peças fabricadas

Neste anexo são apresentados alguns desenhos das peças fabricadas.

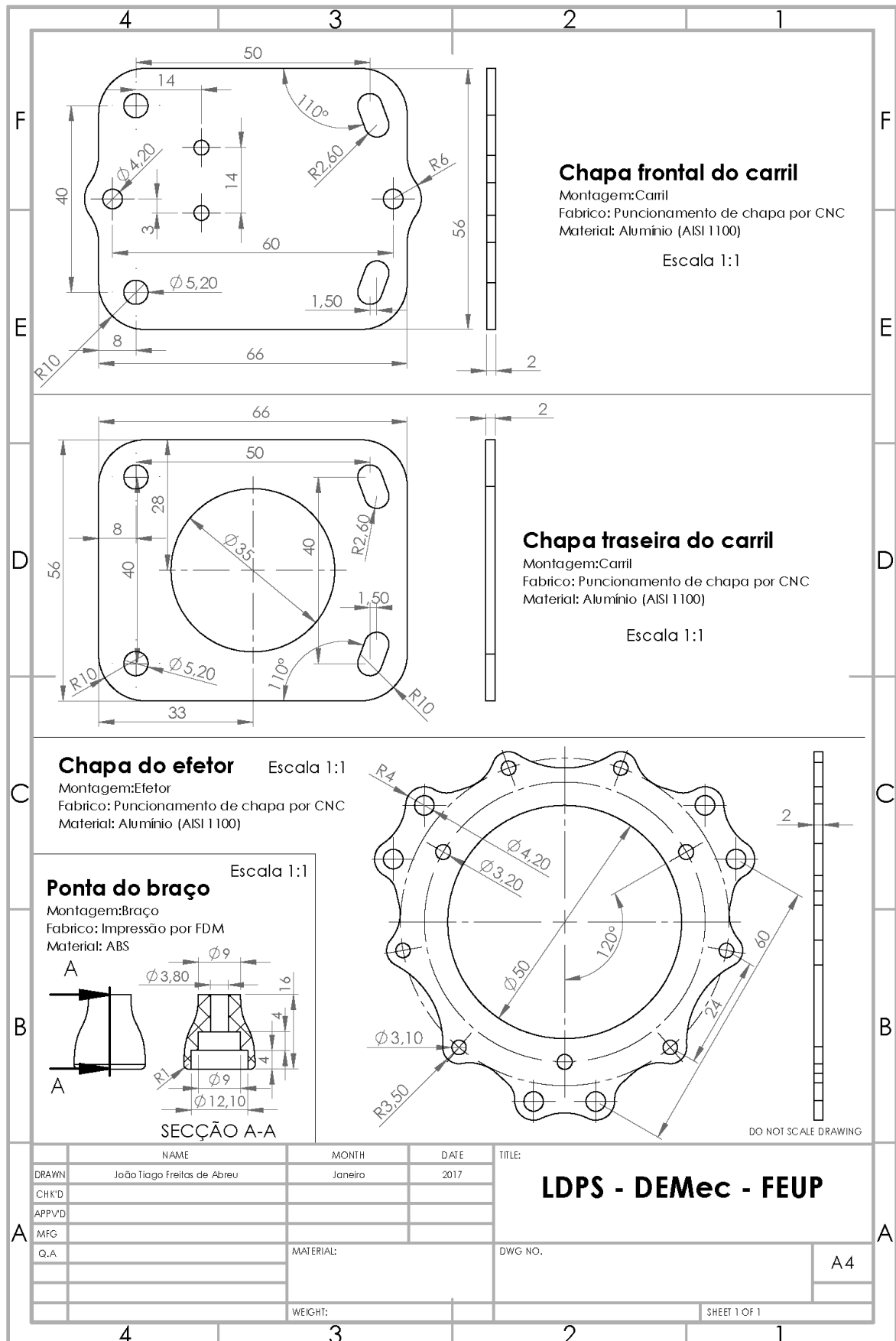


Figura 114 - Chapas dos carris, chapa do efetor e ponta dos braços

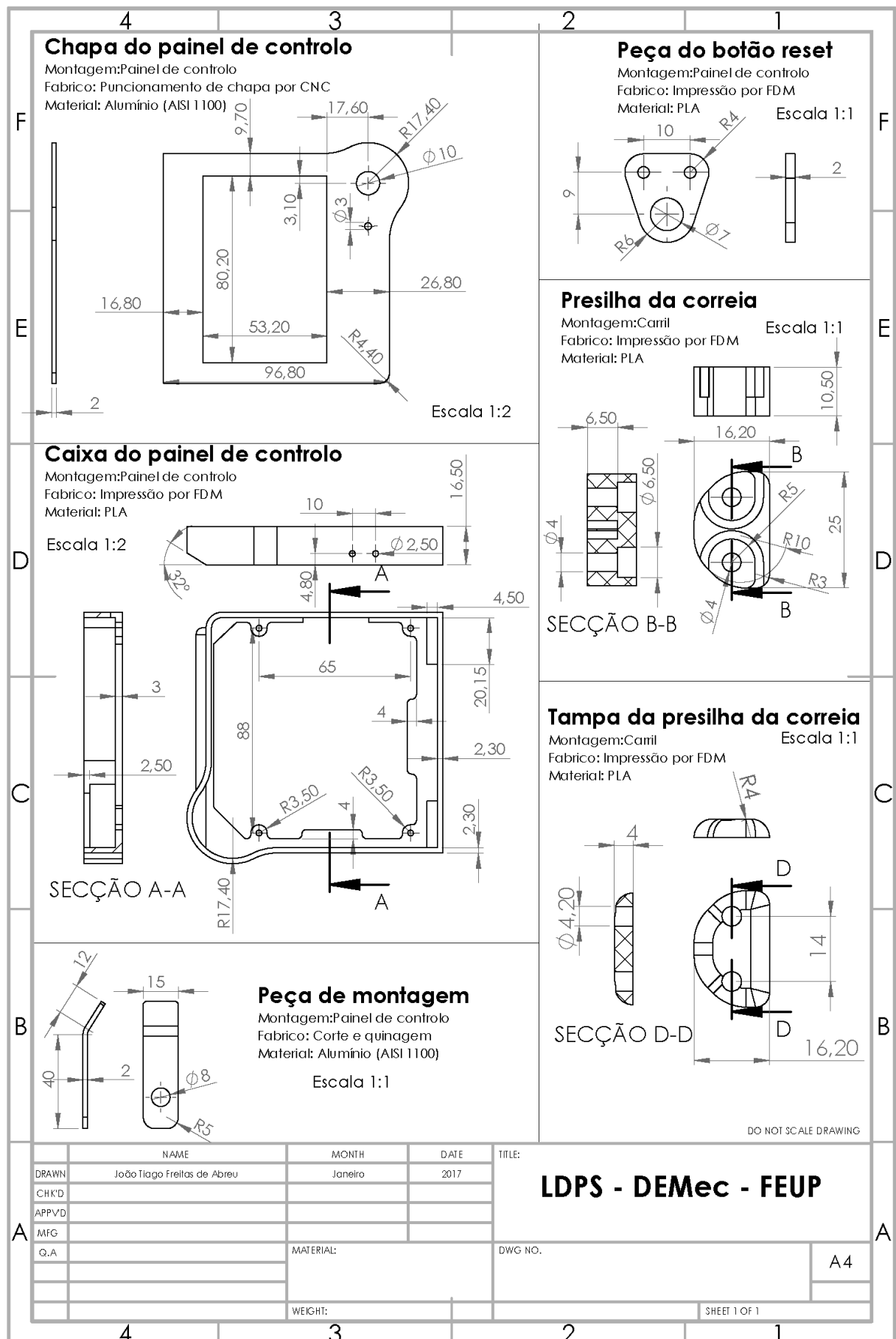


Figura 115 - Peças do painel de controlo e presilha de montagem da correia aos carris.

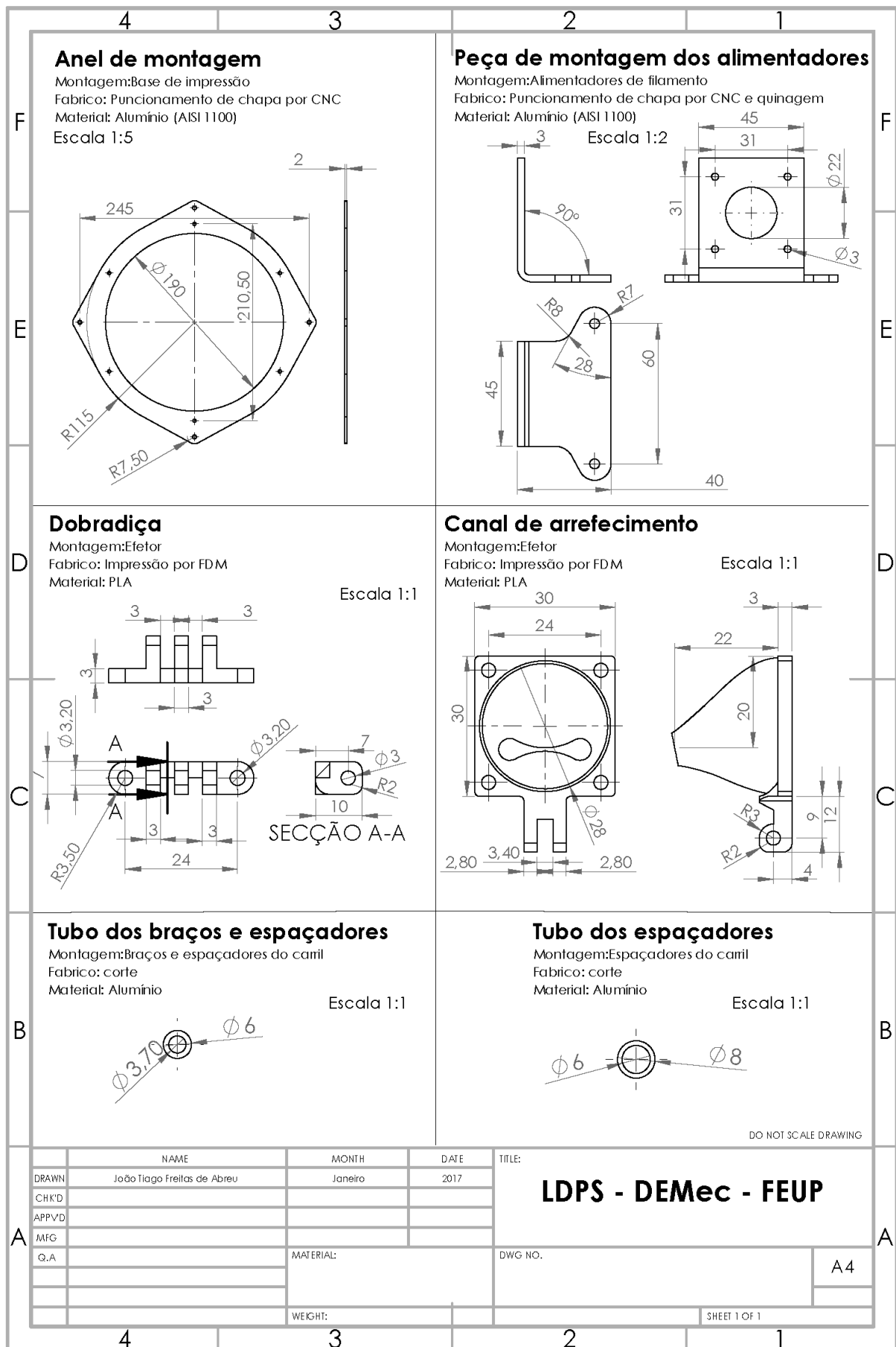


Figura 116 - Anel de montagem da base de impressão, peças o canal de arrefecimento da peça e medida dos tubos usados nos braços e espaçadores dos carris.

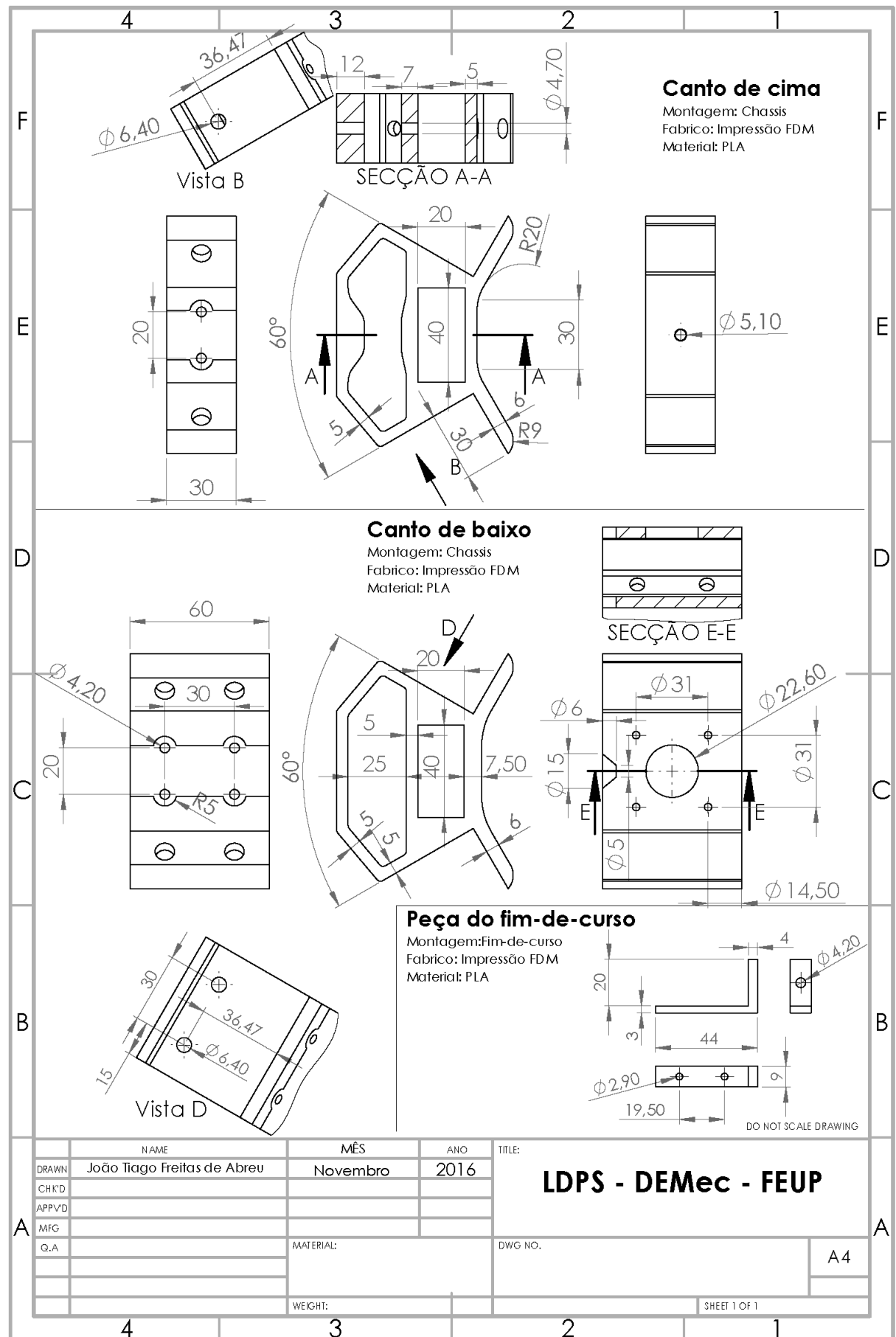


Figura 117 - Cantos de cima e de baixo e peça de montagem dos fins-de-curso